

RESUM

El nombre i longitud de canonades (*pipelines*) que transporten substàncies perilloses (com per exemple amoníac, petroli i derivats d'aquest) ha crescut d'una manera significativa en les darreres dècades degut a les necessitats de la població d'abastir-se d'electricitat, calor, combustible, etc.

Tot i ser extraordinàriament útils, és un fet que aquestes canonades impliquen un cert risc i que han originat accidents de diversa gravetat. Sorprenentment, però, l'esforç i les publicacions dedicats a l'estudi d'aquest risc han estat molt més reduïts que no pas els dedicats a les plantes de procés (indústria química, refineries, etc.).

Aquest projecte té per objectiu, en primer lloc, fer una anàlisi històrica dels diferents accidents ocorreguts al llarg del segle passat, per tal de posar de manifest els diversos riscos associats a aquestes instal·lacions, ja siguin només de caire ambiental o també amb afectació a persones.

En segon lloc, s'analitzen i compararen dos mètodes d'anàlisi de risc proposats pel *Groupe d'Études de Sécurité des Industries Pétrolières et Chimiques*", GESIP, per tal de poder establir quin és el més òptim a l'hora de calcular freqüències i quantificar víctimes mortals. Per fer-ho, es descriu el funcionament dels arbres d'esdeveniments, utilitzats per a predir quins són els possibles escenaris accidentals i estimar quina és la freqüència amb que poden ocórrer. Els efectes dels diversos accidents considerats es simulen amb el software *Aloha* de l'*Environmental Protection Agency* (Agència per a la protecció del medi ambient dels Estats Units) per tal de poder predir el seu abast.

Un cop exposats els models, s'apliquen al transport de dos productes –un d'inflamable i un altre de tòxic– i es calculen els corresponents riscos individuals i socials, comparant els diferents valors obtinguts. Els resultats obtinguts posen de manifest la utilitat de l'anàlisi de riscos per a la possible millora de la seguretat d'aquest tipus d'instal·lacions.

SUMARI

RESUM	1
1. PREFACI.....	4
1.1. Origen del projecte	4
1.2. Motivació	6
2. INTRODUCCIÓ	7
2.1. Objectius del projecte	7
2.2. Àmbit d'aplicació	7
3. ANALISI HISTÒRICA D'ACCIDENTS	8
3.1. Conseqüències dels accidents: dos casos representatius	8
3.2. Base de dades MHIDAS	10
3.3. National Transportation Safety Board	16
4. ARBRES D'ESDEVENIMENTS I CÀLCULS DE FREQUÈNCIES	18
4.1. Exemple de càlcul de freqüències	23
5. DESCRIPCIÓ DELS MÈTODES DE CÀLCUL	25
5.1. Mètode GESIP-1	25
5.2. Mètode GESIP-2	26
6. ESTUDI COMPARATIU – CAS 1	28
6.1. Exemple a estudiar	28
6.1.1. Flamarada (efecte tèrmic)	32
6.1.1.1. Mètode GESIP-1	32
6.1.1.2. Mètode GESIP-2	33
6.1.2. Explosió (Sobrepessió)	34
6.1.2.1. Mètode GESIP-1	34
6.1.2.2. Mètode GESIP-2	34
6.1.3. Càlcul de freqüències	35
6.1.4. Càlcul de víctimes i danys	36
6.1.4.1. Flamarada (efecte tèrmic)	36
6.1.4.2. Explosió (Sobrepessió)	37
6.1.5. Risc individual i línies d'ISO risc	38
6.2. Comparació de resultats	41
6.2.1. Risc individual	41
6.2.2. Risc social	42
7. ESTUDI COMPARATIU – CAS 2	43
7.1. Anàlisi d'una fuga tòxica	43
7.1.1. Dispersió tòxica	44

7.1.1.1. GESIP-1.....	44
7.1.1.2. GESIP-2.....	44
7.1.2. Càlcul de freqüències	45
7.1.3. Càlcul de víctimes i danys.....	46
7.2. Comparació de resultats	49
7.2.1. Combinació dels diferents impactes	50
8. PLANIFICACIÓ TEMPORAL I COSTOS.....	55
9. ESTUDI AMBIENTAL	58
CONCLUSIONS.....	59
BIBLIOGRAFIA.....	60

1. PREFACI

1.1. Origen del projecte

En la societat actual l'ús d'hidrocarburs s'ha convertit en una necessitat per la població així com per al desenvolupament econòmic dels diferents països del món. Aquesta necessitat va associada, essencialment, al consum energètic.

Així doncs, tot i sabent que tant el petroli com els productes derivats d'ell tenen una data de caducitat no gaire llunyana, l'ús d'aquests per fer funcionar motors de combustió, generar electricitat, generar calor, etc. avui dia és imprescindible.

Un dels problemes que deriva d'aquest fet és el transport d'aquestes substàncies arreu del món. Milers de quilòmetres de canonades –oleoductes i gasoductes- transporten petroli i els seus derivats, així com gas natural, des del lloc d'extracció a les plantes de tractament (refinatge, regasificació) i des d'aquestes als llocs de distribució i consum. I és aquí on rau la motivació d'aquest projecte, un estudi dels diferents paràmetres de risc relacionats amb el transport d'hidrocarburs mitjançant canonades (*pipelines*).

L'interès del risc associat al transport per canonada està clarament justificat per l'elevat nombre de *pipelines* que existeix al món. La figura adjunta mostra quina és la situació a escala mundial.

Total Length of Pipelines for Transportation by Country



Figura 1. Longituds instal·lades de canonades de transport en els diversos països

Bé que els països que en tenen més quilòmetres instal·lats són, amb molta diferència, els Estats Units de Nord-Amèrica i Rússia (on hi ha els *pipelines* més llargs: el “*Russian blue stream*”, de gas natural, amb 1.200 quilòmetres, a Rússia, i el “*Trans-Alaska Pipeline System*”, de cru de petroli, amb 1.300 quilòmetres, respectivament), molts altres països tenen també instal·lacions importants.

D'altra banda, les longituds de *pipelines* estan creixent contínuament a la majoria de països. La Figura 2 mostra com han augmentat els quilòmetres de canonada per al transport de gas natural (sense incloure la distribució en els llocs de consum) a la Unió Europea en les darreres dècades. Pot observar-se un creixement continu. La mateixa tendència existeix en els altres sectors com el del transport d'hidrocarburs líquids (petroli o els seus derivats).

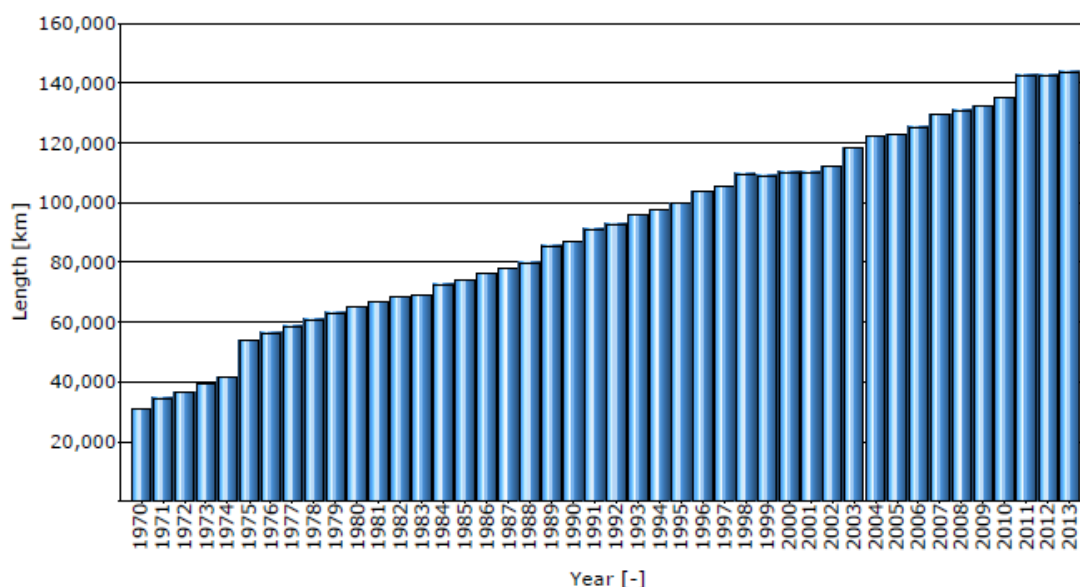


Figura 2. Evolució de la longitud de *pipelines* de gas natural a la Unió Europea en els darrers quaranta-tres anys (font: EGIG, 2015)

Els *pipelines*, siguin soterrats, aeris o en altres condicions, poden patir des de trencaments parcials en forma de petits orificis fins a trencaments totals, donant lloc a fuites de productes inflamables que poden suposar un perill per a les persones i per als diferents béns que puguin haver-hi al voltant. Actualment existeixen uns 3,5 milions de km de canonades construïdes i se n'estan construint uns 190.000 km. més. Una part d'aquestes canonades travessa zones desèrtiques, en les que una pèrdua de contenció implica contaminació ambiental (sòl i subsòl, aigua, aire). Però hi ha també molts llocs en què han de passar molt a prop de zones habitades i nuclis urbans; en aquests casos, a més a més del risc ambiental

apareix el risc per a la població, com, malauradament, han posat de manifest diversos accidents ocorreguts en els darrers anys.

Malgrat alguns estudis realitzats, la existència de models d'anàlisi d'aquest tipus de problemes no es gaire significativa. L'establiment d'una metodologia per a la simulació dels possibles accidents que poden ocórrer en aquestes instal·lacions i la quantificació dels possibles danys que se'n deriven es presenten, per tant, de gran interès.

En aquest projecte s'analitzen dues metodologies per a l'anàlisi d'aquests possibles accidents, una de més conservadora i una altra que no ho és tant, proposades pel "*Groupe d'Études de Sécurité des Industries Pétrolières et Chimiques*", GESIP. Per dur a terme l'anàlisi, s'han utilitzat diversos models matemàtics d'accidents greus (explosions, incendis, dispersió atmosfèrica de fuites tòxiques o inflamables) i, models de vulnerabilitat, així com també el software *Aloha* de l'*Environmental Protection Agency* (Agència per a la protecció del medi ambient dels Estats Units) amb l'objectiu de simular els accidents potencials que poden ocórrer i poder-ne quantificar el seu possible dany, ja sigui amb unes o altres condicions atmosfèriques.

1.2. Motivació

Els diversos motius que han portat a l'autor a escollir aquest projecte han estat els següents:

- Poder predir situacions de risc i quantificar possibles danys pot ésser una eina de gran ajuda per les empreses així com per a l'administració.
- El possible caràcter social d'aquest projecte, l'objectiu final del qual és millorar la seguretat de les persones.
- Un altre ha estat, sense dubte, el seu caràcter mediambiental. És essencial, especialment en les societats industrialitzades, cuidar el nostre entorn i intentar agredir-lo el menys possible.
- Per últim, l'estudi dels diferents escenaris accidentals suposant fuites d'hidrocarburs m'ha resultat atractiu degut al meu interès pel món de la indústria del refinatge del petroli.

2. INTRODUCCIÓ

2.1. Objectius del projecte

Els objectius d'aquest projecte són

1. La realització d'una anàlisi històrica dels accidents ocorreguts en *pipelines*, per a posar de manifest la seva importància així com les seves principals característiques.
2. L'anàlisi d'algunes de les metodologies existents per al càlcul dels riscos associats al transport de productes peril·losos mitjançant *pipelines* fent-ne un estudi comparatiu per tal d'establir quin és el millor model a l'hora de fer càlculs.
3. L'aplicació del mètode seleccionat a un cas concret, per al qual s'han utilitzat diversos models d'accidents greus i l'eina informàtica *Aloha* per dur a terme les simulacions dels possibles escenaris accidentals i els seus abasts, calculant finalment els corresponents valors de risc individual i social.

2.2. Àmbit d'aplicació

El mètode d'anàlisi de risc exposat en el projecte pot aplicar-se tant en l'àmbit del transports de productes peril·losos com, amb la necessària adequació, en el les plantes industrials.

3. ANALISI HISTÒRICA D'ACCIDENTS

3.1. Conseqüències dels accidents: dos casos representatius

A continuació, a mode d'exemple, es presenten dos casos d'accidents amb *pipelines* i les seves repercussions. Al primer van tenir lloc víctimes mortals mentre que al segon només contaminació ambiental

Ghislenghien

El 30 de juliol de 2004 va tenir lloc a Ghislenghien, Bèlgica, el trencament d'un *pipeline* de gas natural que va deixar 24 víctimes mortals i 132 ferits amb ferides de diversa consideració. La fuga produïda va generar una bola de foc ("Fireball") i una ona de sobrepressió que van deixar totalment arrasada l'àrea en un radi de 200 metres, destruint empreses properes així com camps de cultiu. Dins del núvol es van assolir temperatures de fins a 3000 °C, podent-se notar la calor després fins a 2 km de distància.



Figura 3. Núvol de foc. Ghislenghien, Bèlgica, 2004

L'accident va provocar un important nombre de víctimes, especialment entre els bombers i altres forces de seguretat presents en la zona: 24 morts i 132 ferits de diversa consideració. L'estimació econòmica dels danys produïts va ser de 100 milions d'euros.



Fig. 4-a. La canonada després de l'accident, amb el cràter originat per l'explosió



Figura 4-b. Empresa propera a l'accident totalment destruïda

Michigan

El mes de juliol del 2010, un *pipeline* de cru operat per la companyia *Enbridge* va patir un trencament i va contaminar el rierol *Talmadge*, així com el seu afluent major, el *Kalamazoo* (Michigan). La causa de l'accident fou una esquerdada de 2 m de longitud provocada per corrosió sota tensió, deguda a les males condicions del recobriment protector de la canonada. Aquest accident, malgrat no causar cap dany físic en persones humanes, va resultar un dels més costosos en termes econòmics de la història dels Estats Units. 3.200 m³ de petroli van ser vessats en una zona d'aiguamolls, afectant a dos rius. 35 milles dels mateixos van haver de ser tancades per tal de ser netejades. El cost de recuperació va ser de més de 800 milions de dòlars.



Figura 5-a. Orificis del pipeline operat per la companyia Enbridge.



Figura 6-b. Contaminació fluvial provocada per l'accident

3.2. Base de dades MHIDAS

En aquest apartat, amb les dades obtingudes de la base de dades MHIDAS (*Major Hazard Incident Data Service*), [1] s'ha realitzat un estudi històric d'accidents ocorreguts en *pipelines*. Aquesta base de dades va ser creada pel SRD (*Safety and Reliability Directorate*) que pertany al HSE (*Health and Safety Executive*) del Regne Unit; en ella es poden trobar accidents fins i tot anteriors al 1900.

Per a fer l'anàlisi, s'han tractat dades de 1643 accidents ocorreguts entre 1900 i 2005 i s'han fet les següents separacions en el tractament:

- 1. Nombre d'accidents per país
- 2. Nombre d'accidents a nivell mundial separats en diferents intervals d'anys
- 3. Nombre d'accidents depenent de la substància
- 4. Nombre dels diferents tipus d'accidents.
- 5. Nombre de ferits, morts i evacuats.

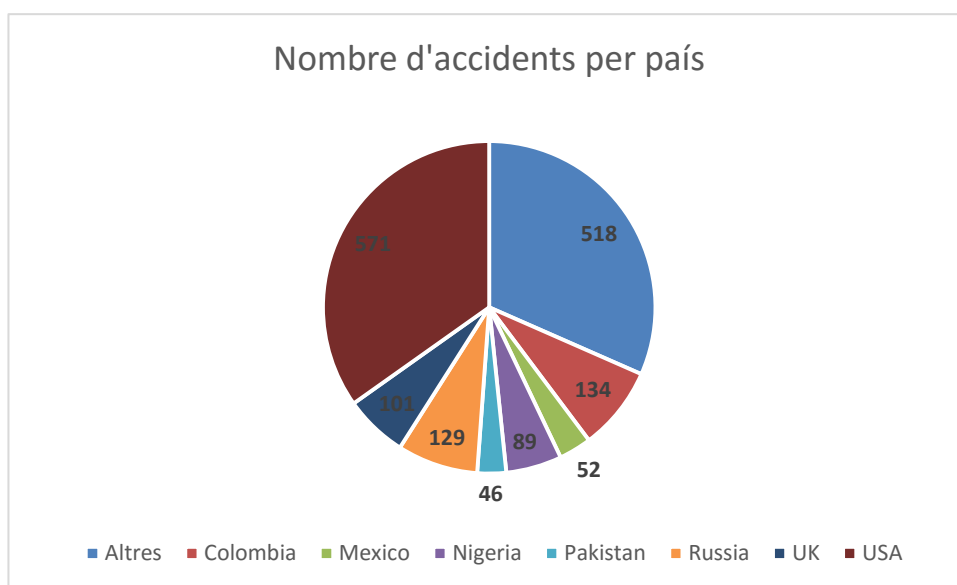


Figura 7. Nombre d'accidents per país

A la [Figura 7](#) s'han representat els resultats relatius al nombre d'accidents classificats per països, amb un total de 95. S'ha donat major importància als països amb més incidències i s'ha inclòs en el grup "altres" els 88 restants trobats a la base de dades. Es pot observar un predomini d'incidents als Estats Units amb una gran diferència sobre el segon, Colòmbia. Aquestes dades, tot i ser relativament representatives, s'han de matisar, atès que en tractar-se d'una base de dades anglosaxona probablement reuneix més accidents de Gran Bretanya, Nord-Amèrica i la Commonwealth que no pas d'altres regions com, per exemple, Sud-Amèrica o de Rússia (un país del qual durant molt de temps s'ha tingut molt poca informació sobre els accidents que hi tenien lloc).

1900-1950	1951-1960	1961-1970	1971-1980	1981-1990	1991-2000	2001-2005
5	1	40	143	210	752	491

Taula 1. Nombre d'accidents separats per diferents intervals d'anys

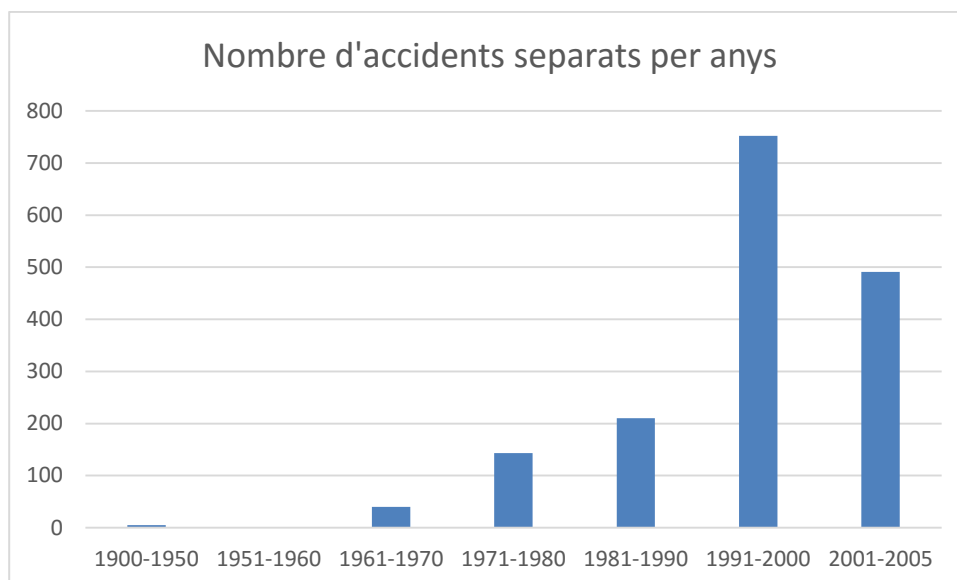


Figura 8. Nombre d'accidents

A la Figura 8 i Taula 1 s'observa una evolució creixent en el nombre d'accidents registrats des de 1900 (amb un total de 1642). Una possible resposta a aquesta tendència a l'alça pot ser el fet de tenir més informació disponible amb el pas dels anys així com un augment significatiu dels km de *pipelines* instal·lats. Cal comentar que al només tenir dades fins l'any 2005, l'últim interval es situa per sota del seu anterior; Ara bé, sembla lògic pensar que, atesa la tendència del conjunt de dades, si la informació analitzada arribés fins a l'any 2020, aquest últim interval, amb una alta probabilitat, seria superior.

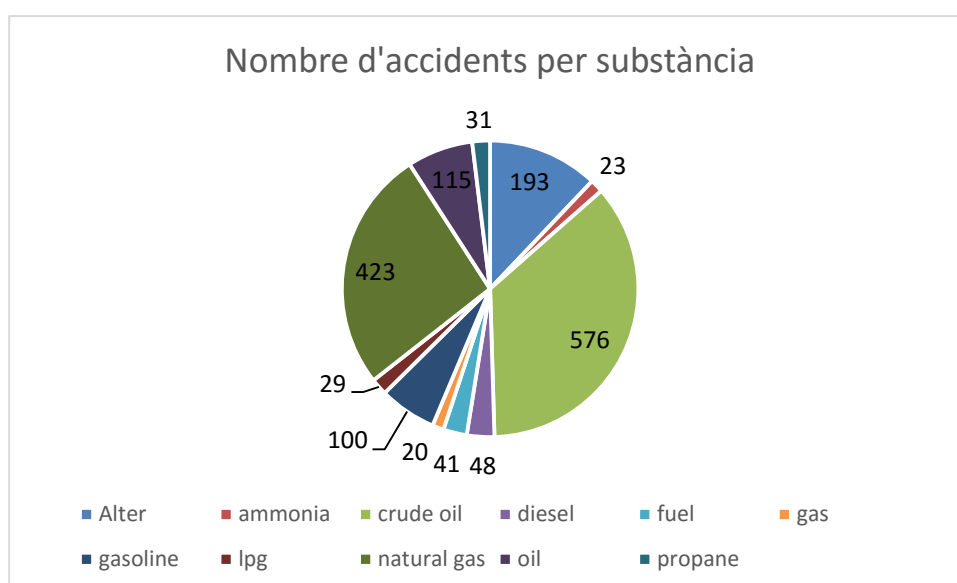


Figura 9. Nombre d'accidents per substància

Malgrat existir certa confusió a l'hora de classificar les substàncies a la base MHIDAS, s'ha decidit fer la classificació tal com mostra la [Figura 9](#). D'un total de 94 substàncies diferents trobades, les predominants són el cru de petroli i el gas natural. Cal remarcar que quasi totes les substàncies són derivats del petroli, a excepció, tal com mostra el gràfic, de l'amoníac.

Que els dos primers llocs estiguin ocupats pel cru de petroli i pel gas natural és lògic, atès que dels milers de quilòmetres de *pipelines* que hi ha instal·lats, la part més important és dedicada al transport d'aquestes dues substàncies.

El tercer lloc l'ocupa el propà (al que caldria sumar el GLP). Cal comentar que en alguns casos apareix certa indefinició, que pot fer difícil la identificació de la substància (com, per exemple, quan la substància és "fuel" (que pot significar simplement "combustible") o "oil" (que pot voler dir petroli)).

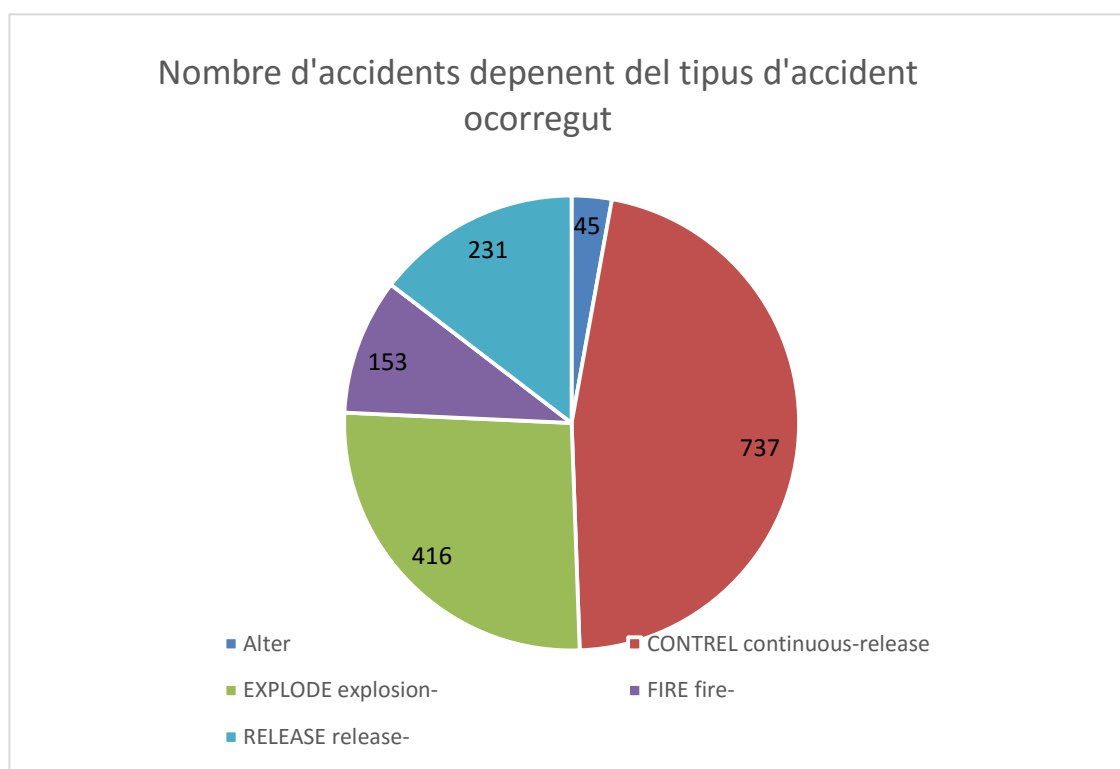


Figura 10. Classificació en funció del tipus d'accident ocorregut.

Si s'analitza el nombre d'accidents en funció de la seva tipologia, es troben quatre grans grups tal com mostra la [Figura 10](#): explosions, fuites, fuites contínues i accidents amb foc. Novament apareix certa indefinició en aquest cas entre fuita ("release") i fuita contínua ("continuous release"). L'accident més freqüent és la fuita contínua que, si la base de dades no dona més informació, cal suposar que no va ser seguida ni d'incendi ni d'explosió; cal tenir en compte que quan hi ha una fuita – per trencament o per perforació de la canonada-

aquesta s'ha de considerar normalment continua, ja que es trigarà un cert temps a parar el transport de gas i, una vegada fet això, encara continuarà la fuga fins que s'hagi buidat els dos trams de canonada que hi ha fins a les vàlvules de bloqueig.

S'han trobat un total de 16 possibles tipus d'accident incloent els 4 grups anteriorment citats; els 12 restants s'han agrupat dins la categoria "altres".

La [Taula 2](#) mostra el nombre total de morts, ferits i evacuats en els 1643 accidents comptabilitzats, així com el nombre d'accidents en el que hi ha hagut morts, ferits o evacuats.

Amb aquestes dades es podria concloure, d'entrada, que un alt nombre de persones ha estat afectat, ja sigui de manera directa o indirecta en accidents relacionats amb *pipelines*. Ara bé, cal tenir en compte que aquests valors corresponent a un període de temps molt llarg; d'altra banda, cal tenir també en compte que els quilòmetres de canonada instal·lats ha crescut extraordinàriament en les darreres dècades. Això implica que aquestes dades s'han de relativitzar. Nogensmenys, és evident que ocorren accidents amb conseqüències greus i que cal, doncs, intentar minimitzar aquestes xifres per tal de poder operar amb més seguretat i disminuir els riscos de perdre vides humanes.

	Nombre de persones afectades	Nombre d'accidents involucrats
Morts	3823	229
Ferits	8443	340
Evacuats	369107	206

Taula 2 Nombre d'accidents, morts, ferits i evacuats

L'anàlisi realitzada ha permès veure també quines són les causes dels accidents més freqüents ([Taula 3](#))

Causa	% de casos
Activitats de tercers	38
Corrosió	21
Fallades mecàniques	20
Error humà	9
Riscos naturals	7
Altres	4

Taula 3 Causes més freqüents dels accidents en canonades

Entre les activitats de tercers la causa més freqüent és l'acció d'una excavadora. En la corrosió, la tipologia més freqüents és la corrosió externa.

3.3. National Transportation Safety Board

Una segona base de dades analitzada en aquest projecte es la de la “*National Transportation Safety Board*” (NTSB). Aquesta, és una agència federal encarregada d’investigar tots els accidents relacionats amb el transport per tal de determinar-ne les possibles causes i intentar prevenir-ne d’altres semblants en el futur. A la [Taula 4](#) es presenten els principals accidents succeïts en *pipelines* als Estats Units en els últims 10 anys.

Localització geogràfica i any	Característiques de l'accident	Conseqüències
New York (EEUU), 2014	Fuita de gas natural i incendi	<ul style="list-style-type: none"> - 8 morts - 50 ferits - 5 edificis destruïts - 100 famílies desallotjades - 1,9 milions de dòlars en pèrdues
Sissonville, West Virginia (EEUU), 2012	Ruptura de canonada de gas amb ignició immediata	<ul style="list-style-type: none"> - Cap persona morta o ferida, només danys materials - 3 cases destruïdes - Àrea d’afectació de 1100 peus - 8,7 milions de dòlars en pèrdues
Romeoville, Illinois (EEUU), 2010	Fuita de petroli (aproximadament uns 6430 barrils)	<ul style="list-style-type: none"> - Danys materials - 46,6 milions de dòlars en pèrdues

Cleburne, Texas (EEUU), 2010	Fuita de gas natural amb ignició immediata ocasionada per un trepant	<ul style="list-style-type: none"> - 1 persona morta - 6 persones ferides - 1 milió de dòlars en pèrdues
San Bruno, California (EEUU), 2010	Ruptura total de canonada de gas natural amb posterior ignició	<ul style="list-style-type: none"> - 8 persones mortes i nombrosos ferits - 38 habitatges destruïts i 70 damnificats
Palm City, Florida (EEUU), 2009	Fuita de gas natural	<ul style="list-style-type: none"> - 3 ferits lleus -36 milions de peus cúbics de gas natural perduts
Plum Borough, Pensilvania (EEUU), 2008	Explosió d'una canonada de gas natural	<ul style="list-style-type: none"> -1 mort - 1 nena ferida greu - 3 cases destruïdes - Pèrdues valorades en 1 milió de dòlars
Kingman, Kansas (EEUU), 2004	Ruptura d'una canonada d'amoníac i filtració a un rierol	<ul style="list-style-type: none"> - Aproximadament 25.000 peixos morts - Costos aproximats de 680.000 dòlars

Taula 4. Principals accidents en els últims 10 anys recollits per la NTSB

Com pot veure's, dels vuit accidents enregistrats hi va haver afectació a persones en cinc casos (en dos d'ells, amb vuit morts i nombrosos ferits). En sis dels accidents la substància involucrada fou gas natural, en un petroli i en un altre amoníac. En aquests dos darrers no hi hagué víctimes però l'afectació mediambiental fou considerable.

4. ARBRES D'ESDEVENIMENTS I CÀLCULS DE FREQUÈNCIES

Per tal d'analitzar, en l'anàlisi dels riscos associats a una possible fuga de producte perillós els possibles escenaris accidentals que poden aparèixer, es fan servir els arbres d'esdeveniments. Aquests, que poden aplicar-se ja sigui a una canonada, a un dipòsit o a qualsevol altre tipus d'equipament, parteixen d'unes hipòtesis inicials, que una vegada fixades donen lloc a una sèrie de seqüències d'esdeveniments amb possibles escenaris finals.

D'aquests escenaris finals, els més rellevant que es tracten en aquest projecte són els següents [2]:

- **Incendi de toll (*Pool Fire*):** Ignició d'un toll de líquid inflamable que sol ser generalment un hidrocarbur. L'incendi de toll es pot produir tant a una zona confinada com a l'aire lliure, i és possible tant sobre el sòl com sobre l'aigua.

- **Flamarada (*Flash Fire*):** Foc intens, en el qual la flama es propaga a través d'una barreja d'aire i gas inflamable que es troba entre els límits d'inflamabilitat. Aquest fenomen es produeix quan la dispersió atmosfèrica de gas/vapor inflamable troba un punt d'ignició i la flama es propaga a través del núvol inflamable. Si el vapor prové d'un toll, la flamarada pot acabar provocant un incendi de toll; si prové d'un doll de gas, pot acabar provocant un doll de foc.

- **Doll de foc (*Jet Fire*):** Ignició d'una fuga continua de gasos o vapor inflamables continguts en conduccions o contenidors amb sobrepressió

- **BLEVE / Bola de foc (*Fireball*) :** Aquests dos fenòmens acostumen a aparèixer associats. La BLEVE suposa un trencament catastròfic d'un contenidor que emmagatzemi, per exemple, gas líquid, a una pressió tal que la seva temperatura sigui superior al seu punt d'ebullició a la pressió atmosfèrica; En aquest cas es produeix la fuga massiva i instantània del líquid a l'atmosfera. El ràpid descens de pressió al qual es veu sotmès el producte fuitat en el moment del trencament, provoca un flash explosiu (vaporització) d'una part del líquid, que forma un núvol de vapor i petites gotes de líquid en suspensió. Si el producte és inflamable i troba un punt d'ignició, pot produir-se la combustió de la mescla, donant lloc al segon fenomen perillós, la bola de foc. Com que el núvol és pobre en aire, només pot cremar per la seva perifèria; això fa que el fenomen duri un cert temps, desprenent una forta radiació.

Depenent de les propietats de la substància i d'altres factors com poden ser els ambientals o

el material del qual està feta la canonada/tanc, els arbres d'esdeveniments seran diferents.

Així doncs, segons quines siguin les circumstàncies, les probabilitats de tenir un o altre escenari [3] final variaran significativament. A continuació es presenten els arbres d'esdeveniments tipificats per a diverses situacions/substàncies

En la Figura 11 es pot observar l'arbre d'esdeveniments per substàncies líquides inflamables i volàtils (per exemple, la gasolina). Si s'analitza, es pot veure que la hipòtesi inicial és una fuga de producte contaminant. A partir d'aquest element iniciador, la seqüència continua amb possibles escenaris depenent de què s'esdevinguin determinats successos (ignició immediata, ignició retardada i sobrepressió), cadascun amb la seva probabilitat, fins arribar a quatre possibles escenaris accidentals finals: incendi de toll; explosió mes incendi de toll; flamarada mes incendi de toll i cap conseqüència.

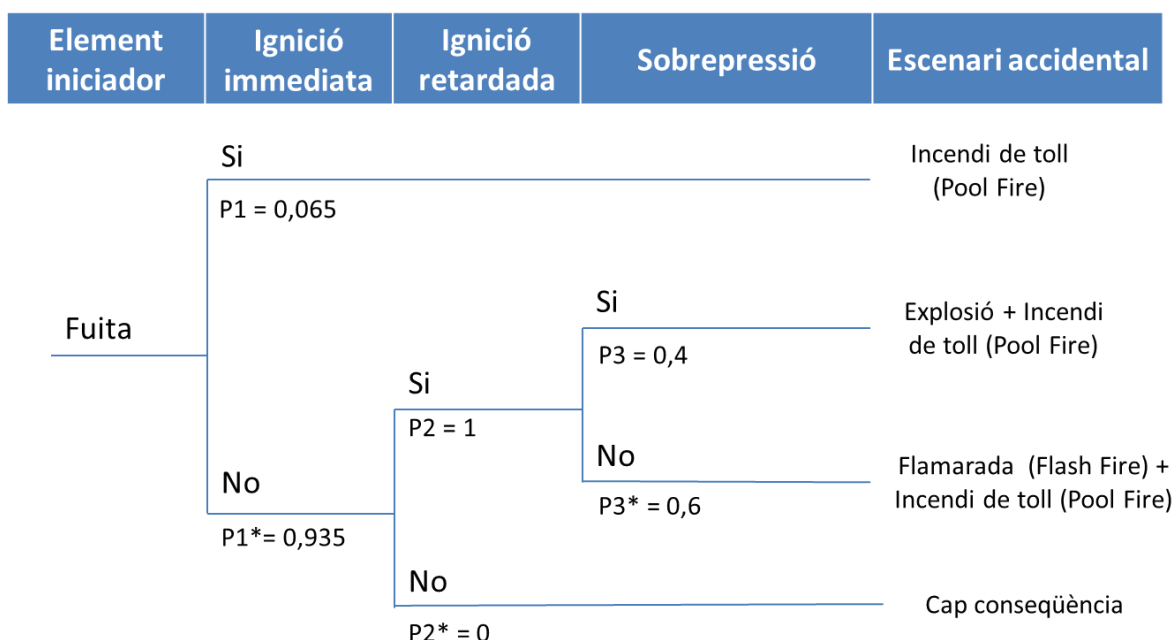


Figura 11. Arbre d'esdeveniments per a fuites contínues de substàncies líquides inflamables i volàtils.[3]

La Figura 12 mostra l'arbre d'esdeveniments per a fuites constants de gasos líquats pressuritzats inflamables (per exemple, el metà). S'observa que al canviar la substància, malgrat ser les seqüències idèntiques, les probabilitats són diferents tal com s'ha explicat anteriorment. Cal remarcar també que els escenaris finals, depenent del cabal de contaminant, poden variar. Un exemple es troba en aquest mateix arbre, podent obtenir com a escenari accidental final un incendi de toll o un doll de foc després de la ignició immediata del contaminant.

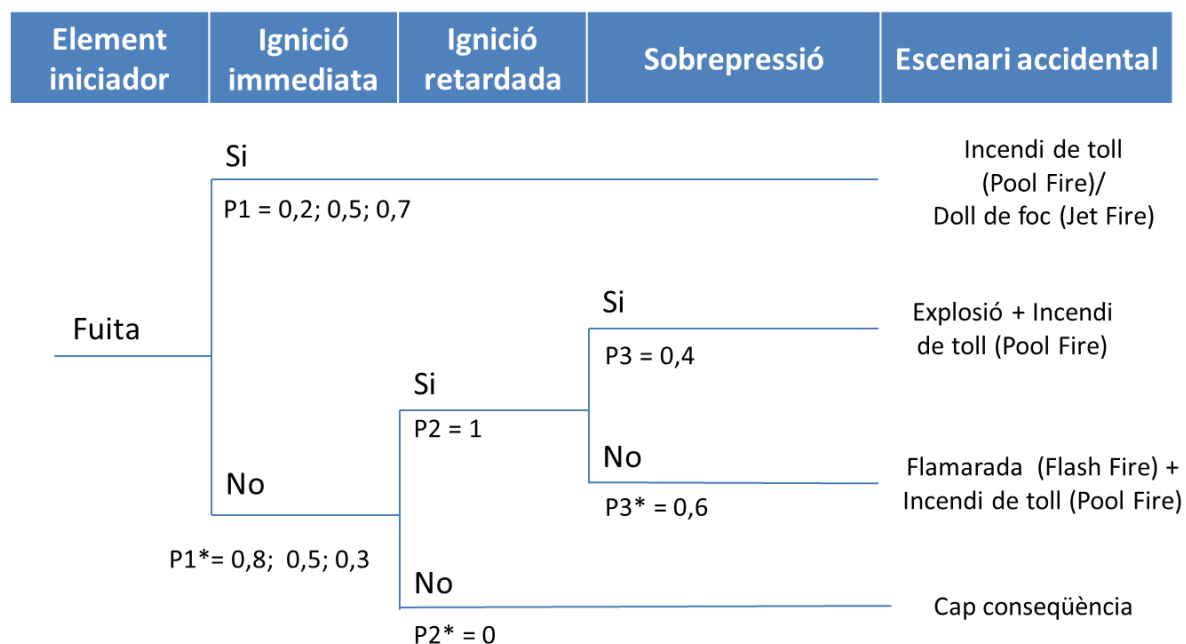


Figura 12. Arbore d'esdeveniments per a fuites contínues de gasos líquats pressuritzats inflamables [1]

A la Figura 13 es mostra l'arbre d'esdeveniments d'una fuita instantània de gas líquat pressuritzat inflamable.

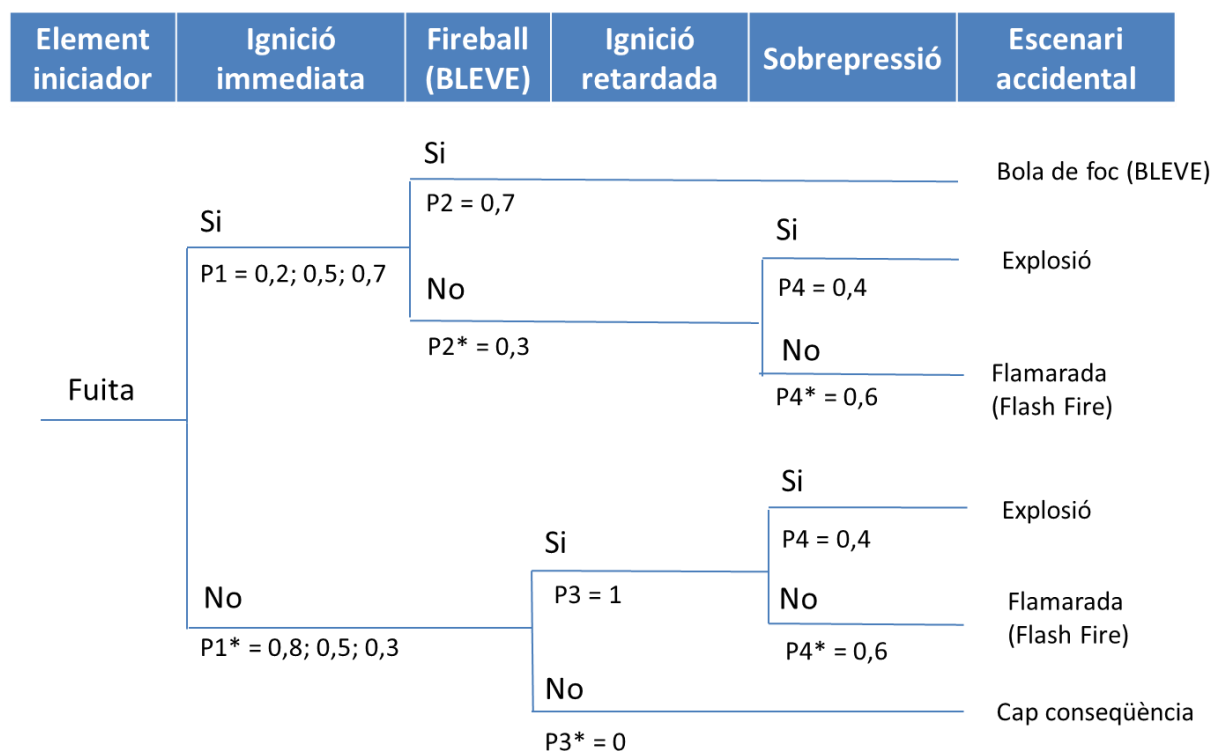


Figura 13 Arbore d'esdeveniments per a fuites instantànies de gas líquat pressuritzat inflamable [1]

Malgrat ser el mateix component que el de la Figura 12, al ser una fuga instantània i no continua, l'arbre canvia significativament. Apareix doncs la possibilitat d'un altre accident, el de BLEVE-bola de foc.

Altres exemples d'arbres d'esdeveniments podrien ser els que es mostren a la Figura 14 (substàncies líquides tòxiques i inflamables) i la Figura 15 (líquids inflamables refrigerats).

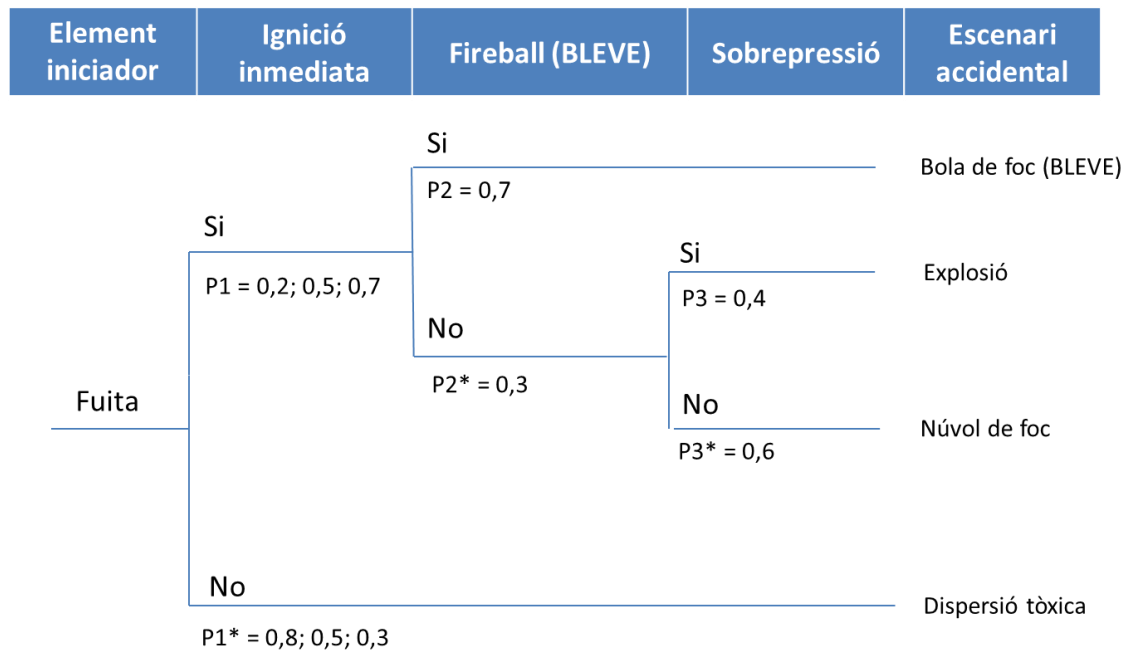


Figura 14. Arbre d'esdeveniments per a substàncies líquides, tòxiques i inflamables [1]

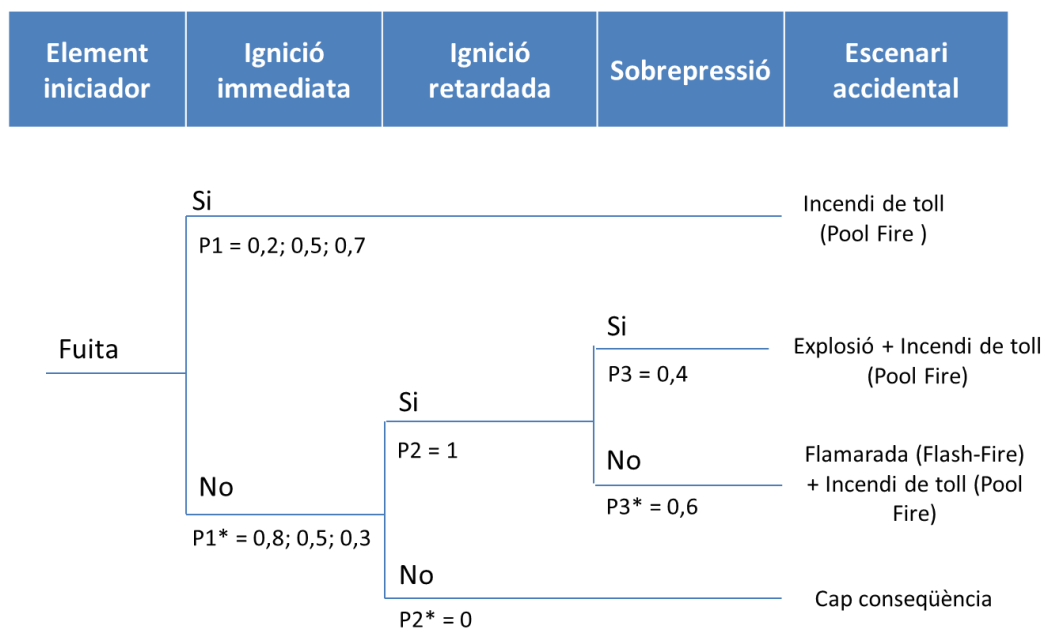


Figura 15 Arbre d'esdeveniments per a líquids inflamables refrigerats [1]

Una altra funció dels arbres d'esdeveniments es la de facilitar el càlcul de freqüències per a cada escenari accidental. Així doncs, depenent de la probabilitat de cada esdeveniment, aquestes tindran un valor determinat. S'obtenen aplicant l' [Equació 1](#).

$$F_{\text{escenari accidental}} = F_{\text{inicial}} * L * \prod_{n=1}^{n=i} P_i$$

Equació 1

Les freqüències inicials depenen del tipus de fuga (orifici, trencament total...) així com del diàmetre nominal de la canonada. Es poden trobar definides en diferents publicacions com per exemples als informes de “*European Gas Pipeline Incident Data Group*” o del GESIP, o al manual Beví. Per a canonades venen donades en unitats de distancia-1·temps-1 ([Taula 5](#), [Taula 6](#) i [Taula 7](#)).

DN	d < 12 mm	12 mm < d < 70 mm	d > 70 mm
D < 200 mm	3,77 * 10 ⁻⁴	4,56 * 10 ⁻⁴	1,65 * 10 ⁻⁴
200 mm < D < 400 mm	1,85 * 10 ⁻⁴	1,16 * 10 ⁻⁴	1,16 * 10 ⁻⁴
400 mm < D < 600 mm	1,53 * 10 ⁻⁴	0,15 * 10 ⁻⁴	1,07 * 10 ⁻⁴
D > 600 mm	0,1 * 10 ⁻⁴	0,1 * 10 ⁻⁴	0,18 * 10 ⁻⁴

Taula 5. Dades de freqüència proposades per a Gas Natural pel GESIP (2012) [4]

Forat petit	No es té en compte
Forat mitjà	2,243 * 10 ⁻⁴
Forat gran	7,475 * 10 ⁻⁵

Taula 6. Dades de freqüència proposades per la European Gas Pipeline Incident Data Group (2009)

	DN < 75 mm	75 mm < DN < 150 mm	DN > 150 mm
Trencament total	$1,10 \cdot 10^{-6}$	$3,10 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-7}$
Orifici amb d = 10% DN amb un màxim de 50 mm	$5,10 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-7}$

Taula 7. Dades de freqüència proposades pel manual Beví (2009) [5]

4.1. Exemple de càlcul de freqüències

En el següent exemple s'analitza el càlcul de freqüències per a un trencament total d'una canonada de gas metà de 300 mm de diàmetre i 1 km de longitud (Figura 16).

Observant les taules de valors per a gas natural, s'obté una freqüència inicial de $1,16 \cdot 10^{-4}$ vegades $\text{km}^{-1} \cdot \text{any}^{-1}$

Aplicant l' [Equació 1](#) a les diverses seqüències s'obtenen les següents expressions, on el primer terme equival a la freqüència inicial, el segon a la longitud de la canonada i el tercer al producte de les diferents probabilitats de la seqüència accidental triada. Se suposa un cabal de fuga m' comprès entre 10 i 100 $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ($10 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \leq m' < 100 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$).

$$F1 = 1,16 \cdot 10^{-4} \cdot 1 \cdot 0,5 = 5,8 \cdot 10^{-5} \text{ any}^{-1}$$

$$F2 = 1,16 \cdot 10^{-4} \cdot 1 \cdot (0,5 \cdot 1 \cdot 0,4) = 2,32 \cdot 10^{-5} \text{ any}^{-1}$$

$$F3 = 1,16 \cdot 10^{-4} \cdot 1 \cdot (0,5 \cdot 1 \cdot 0,6) = 3,48 \cdot 10^{-5} \text{ any}^{-1}$$

$$F4 = 1,16 \cdot 10^{-4} \cdot 1 \cdot (0,5 \cdot 0) = 0 \text{ any}^{-1}$$

Aquestes freqüències, juntament amb les probabilitats dels esdeveniments intermedis, han estat incloses a l'arbre d'esdeveniments corresponent (Figura 16).

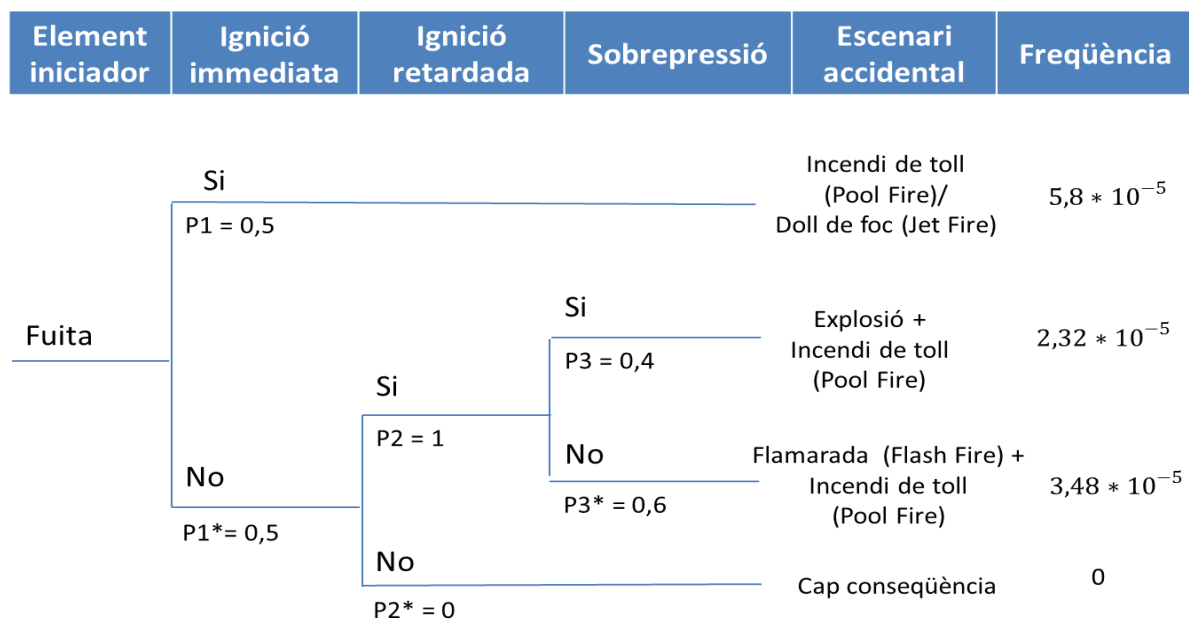


Figura 16. Arbre d'esdeveniments amb freqüències calculades per a gas metà

5. DESCRIPCIÓ DELS MÈTODES DE CàLCUL

5.1. Mètode GESIP-1

Pel que fa al mètode GESIP-1, proposat *pel Group d'Études de Sécurité des Industries Pétrolières et Chimiques*, es considera que una fuga afecta al poble o nucli urbà quan aquesta toca un determinat punt situat al centre del mateix. Així doncs, tal com es mostra a la [Figura 17](#), si es considera una determinada posició per al nucli urbà en relació amb el *pipeline*, a l'hora de calcular la llargada d'afectació, només es tindrà en compte aquella sobre la qual els efectes d'una fuga puguin arribar a tocar aquest "punt" al centre de la població.

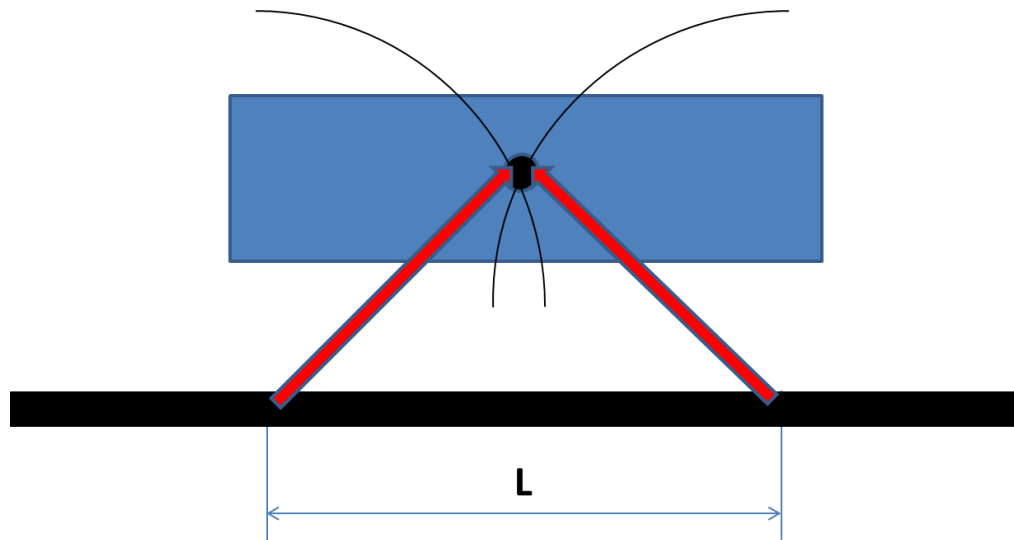


Figura 17. Exemplificació del mètode GESIP-1, mostrant la longitud de canonada a tenir en compte per al càlcul d'efectes de l'accident

En la

[Figura 18](#) es pot veure d'una manera més clara com la fuga representada en color vermell arriba a tocar el punt i per tant es té en compte; en canvi, la senyalitzada en color groc que, les mateixes dimensions i el mateix radi d'acció, no arriba a afectar al centre de la zona. La fuga marcada en vermell representa, per a aquest escenari accidental, la situació límit d'afectació, establint per tant el punt on acaba –o comença– el tram de canonada sobre el qual una pèrdua de contenció pot afectar l'objectiu. La distància a comptabilitzar per al càlcul de les freqüències es, segons aquesta metodologia, el doble de la distància projectada.

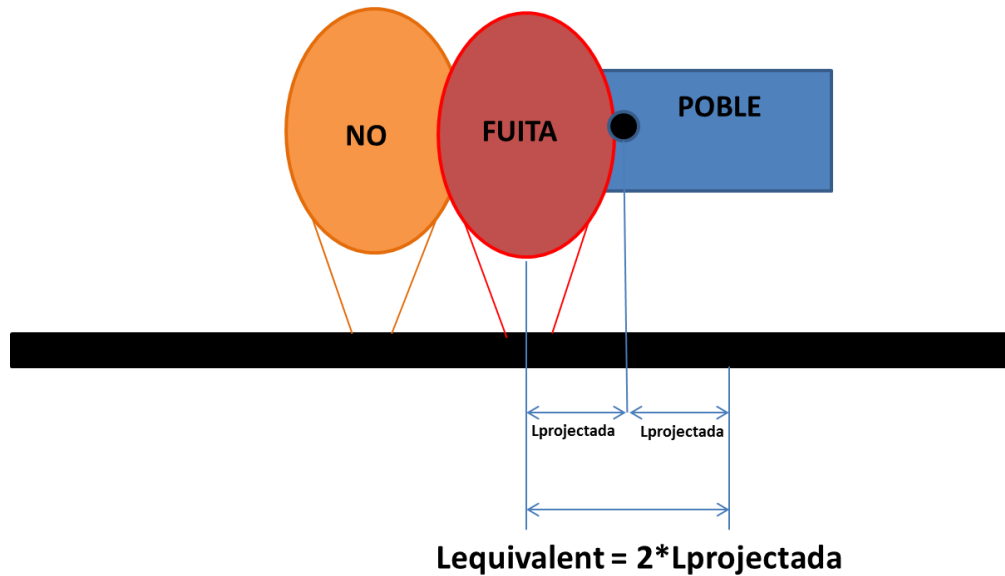


Figura 18. Exemplificació de longitud equivalent al mètode GESIP-1 (2012)

5.2. Mètode GESIP-2

En aquest segon mètode, la distància equivalent a considerar de *pipeline* acostuma a ser superior, ja que es tenen en compte les fuites que poden afectar a qualsevol punt el nucli urbà, ja sigui al centre o al perímetre, tal com es veu a la Figura 19. És evident que, en aquest cas, la distància d'afectació de la canonada serà més gran.

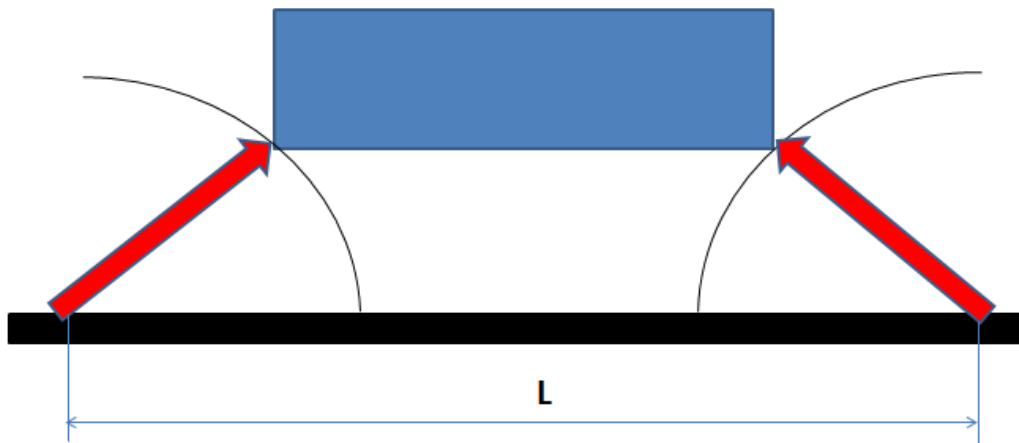


Figura 19. Exemplificació del mètode GESIP-2 (GESIP, 2012)

La distància a tenir en compte per al càlcul de freqüències en aquest cas, serà la distància projectada L dues vegades, més la llargada del nucli urbà que s'estigui analitzant. Aquesta longitud s'ha representat esquemàticament a la Figura 20.

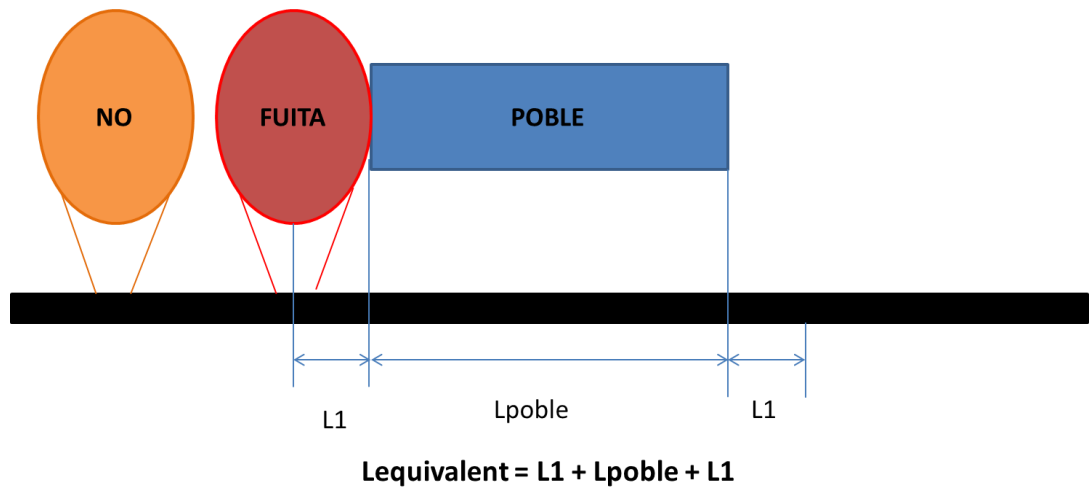


Figura 20. Esquema del càlcul de la longitud equivalent en el mètode GESIP-2

És evident que la longitud de la canonada a tenir en compte és, segons aquest mètode, més gran que la establerta segons el mètode anterior. Per tant, per a un determinat escenari accidental, la freqüència (que és funció de la longitud de canonada) serà, per a un determinat accident, més elevada.

6. ESTUDI COMPARATIU – CAS 1

6.1. Exemple a estudiar

L'exemple a analitzar per tal de comparar els dos mètodes és el que s'esquematitza a la [Figura 21](#). S'estudia el trencament total d'una canonada soterrada que transporta gas propà. A 100 metres en direcció nord es situa un nucli urbà amb una extensió rectangular de 200 metres de Nord a Sud i 300 metres d'Est a Oest. Dins el nucli urbà hi viuen repartides uniformement 600 persones. Pel que fa a les condicions meteorològiques se suposa una estabilitat atmosfèrica F i vent del Sud amb una velocitat d'1,5 m/s.

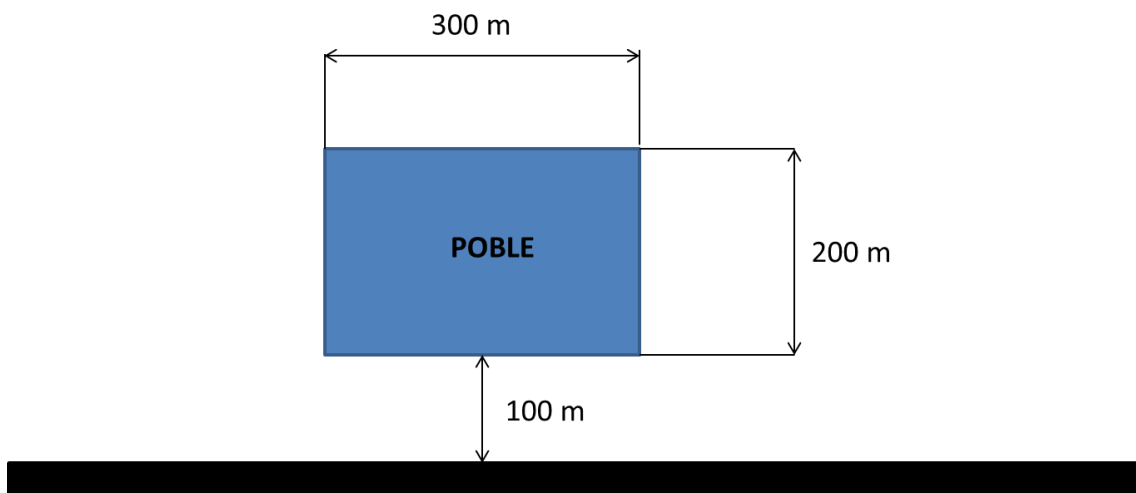


Figura 21. Exemple a analitzar

El vessament de producte té una durada de 60 minuts, amb un cabal de 1500 kg/min. Aquestes condicions són, possiblement, extremes –és poc probable un vessament d'aquesta magnitud durant un temps tan llarg– però s'han establert per tal d'aconseguir un dany significatiu en la zona afectada.

Per a gas propà, l'arbre d'esdeveniments corresponent és el de gasos líquids pressuritzats extremadament inflamables ([Figura 13](#)).

Tal com es pot veure en aquest arbre, si no hi ha ignició immediata, els dos possibles escenaris finals que es poden trobar són el de flamarada (*Flash Fire*) o explosió (Sobrepessió). A la [Figura 22](#) i [Figura 23](#) s'observen les simulacions realitzades amb el software *Aloha* de les condicions descrites anteriorment, amb l'abast i les zones cobertes per ambdós escenaris accidentals.

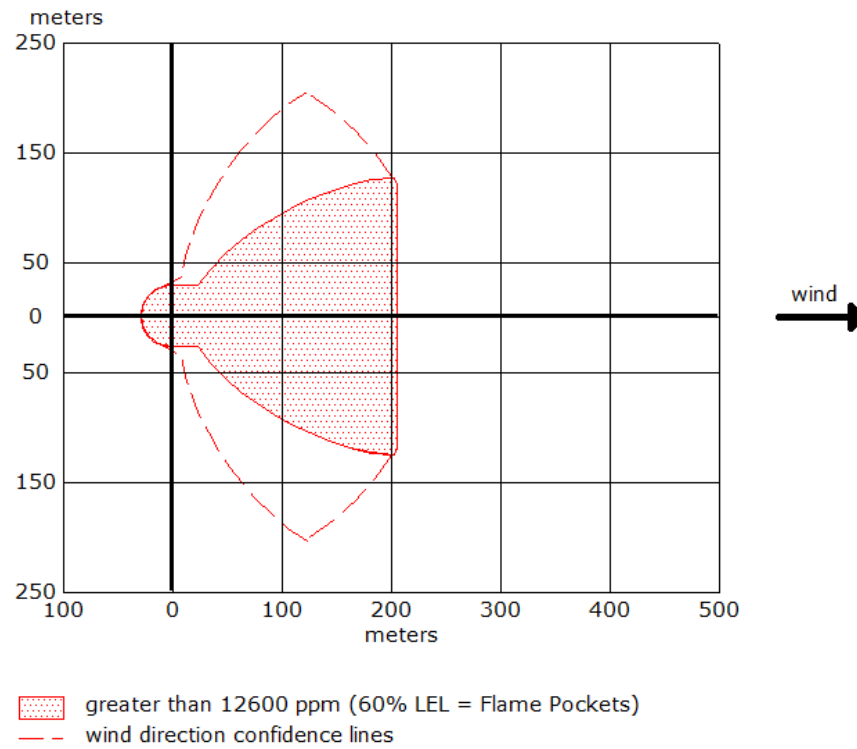


Figura 22. Abast de la flamarada, simulat a Aloha.

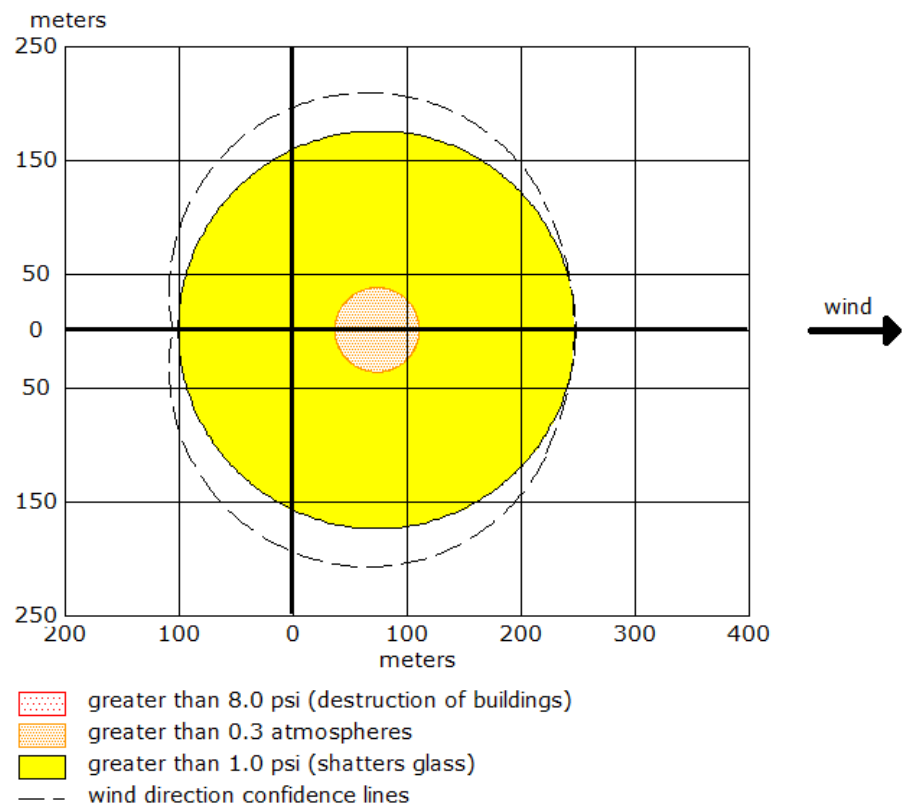


Figura 23. Abast de explosió per sobrepressió, simulat per Aloha.

Per a la flamarada s'ha adoptat com a zona inflamable la corresponent al 60% del límit inferior d'inflamabilitat; és un criteri conservador, però aconsellable atesa la irregularitat en aquest tipus de dispersió i la influència de les turbulències durant la mateixa flamarada. La seva acció arriba fins a una distància de 200 m.

Pel que fa a l'explosió, es disposa de valors aproximats dels efectes de la sobrepressió sobre equipament, edificis i persones ([Taula 8](#)).

Peak overpressure, kPa	Damage	Peak overpressure, bar
0.15	Annoying noise	0.0015
0.2	No structural damage; occasional breaking of large window panes already under strain	0.002
0.3	Loud noise similar to sonic boom; occasional glass failure	0.003
0.7	Breakage of small windows under strain	0.007
1	Typical threshold for glass breakage	0.01
2	Probability of 0.95 of no serious damage beyond this value; some damage to house ceilings; 50% of window glass broken	0.02
3	Limited minor structural damage	0.03
3.5-7	Windows usually shattered; occasional damage to window frames	0.035-0.07
5	Minor damage to house structures	0.05
7	Collapse of roof of a tank	0.07
8	Partial demolition of houses, made uninhabitable	0.08
7-15	Corrugated asbestos shattered. Corrugated	0.07-0.15

	steel or aluminum panels fastenings fail, followed by buckling; wood panel fastenings fail, panels blown in	
10	Steel frame of clad buildings slightly distorted	0.1
15	Partial collapse of walls and roofs of houses	0.15
15-20	Unreinforced concrete or cinderblock walls shattered	0.15-0.2
18	Lower limit of serious structural damage; 50% destruction of brickwork of houses	0.18
20	Heavy machines in industrial buildings suffer little damage; steel frame building distorted and pulled away from foundations	0.2
20-28	Frameless, self-framing steel panel building demolished; rupture of oil storage tanks	0.2-0.28
20-40	Large trees fall down	0.2-0.4
30	Cladding of light industrial buildings ruptured. Panelling torn-off	0.3
35	Breakage of wooden telephone poles; most buildings destroyed, except for concrete reinforced shear wall buildings; "plating" of cars and trucks pressed inwards	0.35
35-40	Displacement of pipe bridge, failure of piping	0.35-0.4
35-50	Near-complete destruction of houses	0.35-0.5
40-55	Collapse of pipe bridge	0.4-0.55
50	Loaded tank cars/train wagons overturned; brick walls, 20-30 cm thick, collapse	0.5
50-55	Unreinforced brick panels, 25-35 cm thick, fail by shearing or flexure	0.5-0.55

60	Loaded train boxcars completely demolished	0.6
70	Probable total destruction of buildings; heavy machine tools moved and badly damaged	0.7

Taula 8. Valors aproximats dels efectes de la sobrepressió sobre equipaments, edificis i persones [2]

I també hi ha equacions Probit per a l'estimació de les conseqüències de l'ona de sobrepressió sobre persones. Ara bé, en la pràctica el que es fa en les anàlisis de risc –en base a l'experiència acumulada en aquest tipus d'explosions- és considerar simultàniament els efectes directes (mortalitat per aixafament de la caixa toràctica) i els indirectes (mortalitat per fragments projectats o enfonsament d'edificis). Per tant, s'ha considerat com a letal el valor de 0,3 atm.

6.1.1. Flamarada (efecte tèrmic)

En aquest apartat es calcula la distància equivalent (o tram d'afectació) de canonada a tenir en compte per a un accident amb flamarada depenent del mètode escollit. Per tal de calcular-la, s'ha assimilat la fuga de la [Figura 22](#) a una geometria triangular (molt semblant a la predicció del plomall pel programa *Aloha*) i s'ha situat el plomall en la posició més allunyada possible en la que arriba a afectar a l'objectiu.

6.1.1.1. Mètode GESIP-1

Mitjançant la simulació i aplicant als valors obtinguts el mètode proposat pel GESIP-1 tal com es mostra a la [Figura 24](#), la longitud obtinguda del tram de canonada és de 250 metres (el doble de la distància projectada corresponent al plomall inflamable situat en la posició més allunyada possible). Es suposa a la població (element vulnerable) concentrada en un punt situat exactament al centre del nucli urbà.

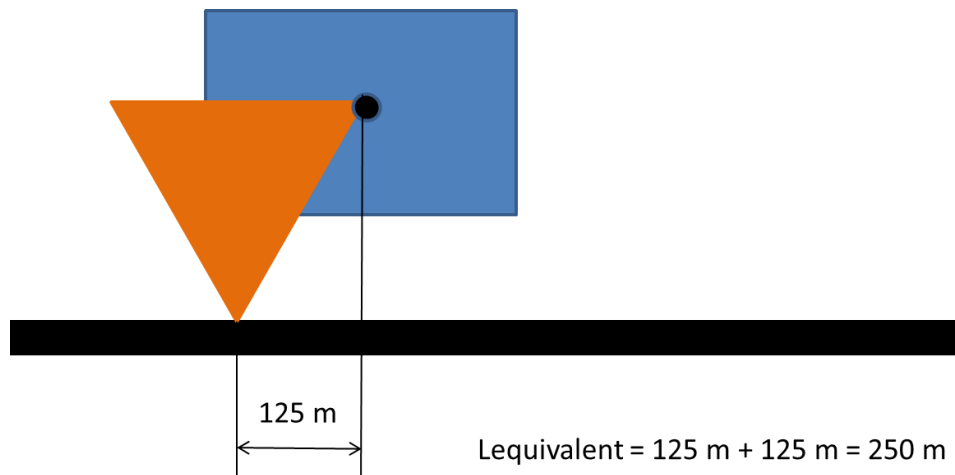


Figura 24. Càlcul $L_{equivalent}$ pel Mètode GESIP-1 (flamarada)

6.1.1.2. Mètode GESIP-2

Pel que fa al segon mètode, la distància obtinguda es de 550 metres (Figura 25). En aquest cas s'ha considerat l'element vulnerable (població) distribuït de manera uniforme sobre tota la superfície de la zona urbana; per tant, es considera el doble de la distància projectada més la longitud d'aquesta zona.

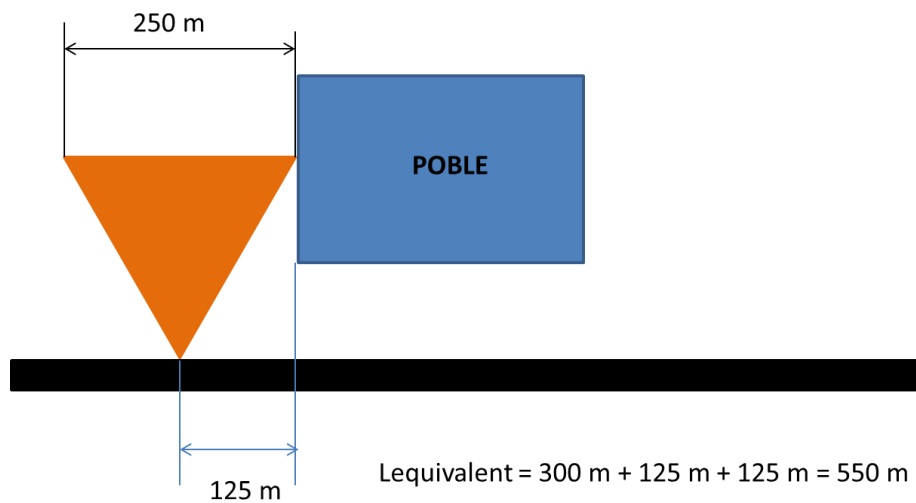


Figura 25. Càlcul $L_{equivalent}$ pel Mètode GESIP-2 (flamarada)

6.1.2. Explosió (Sobrepressió)

A l'hora de calcular la distància equivalent de canonada per l'escenari accidental d'explosió (amb efecte de sobrepressió), s'ha tingut en compte una geometria exactament circular i només l'àrea de la circumferència menor (Figura 23), ja que és en aquesta zona on es registra un valor que implica la letalitat 100%.

6.1.2.1. Mètode GESIP-1

En aquest cas s'ha decidit concentrar tota la població en un punt al mig del nucli urbà pel que fa a l'eix X, però a la posició 0 a l'eix Y. (Figura 26). Aquest canvi és degut a la voluntat de provocar víctimes entre la població, cosa que no passaria si el punt romangués al centre de la zona habitada (com a la Figura 24). La distància equivalent determinada és de 50 metres (el radi de la zona de letalitat és 25 m).

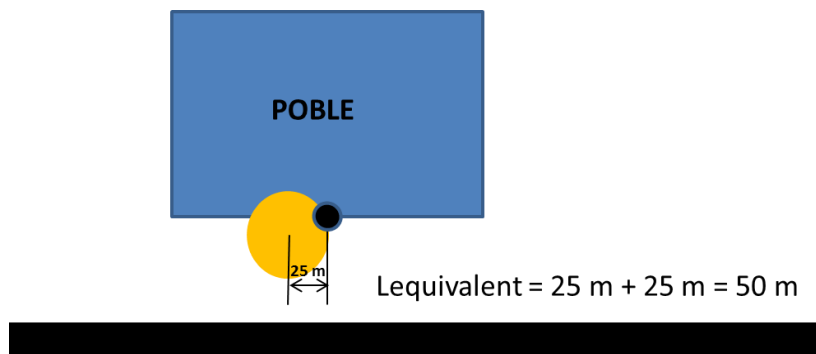


Figura 26. Càlcul de Lequivalent pel Mètode GESIP-1 (sobrepressió)

6.1.2.2. Mètode GESIP-2

Aplicant el mètode 2 tal com mostra la Figura 27 s'obté una longitud equivalent de canonada de 350 metres.

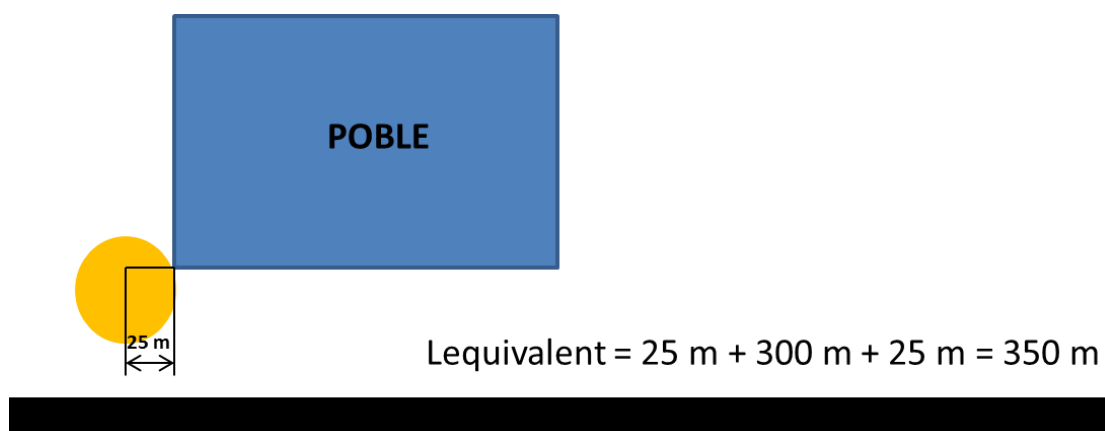


Figura 27. Càlcul Lequivalent pel Mètode GESIP-2 (sobrepressió)

Les longituds equivalents corresponents als dos escenaris i als dos mètodes de càlcul s'han resumit en la [Taula 9](#).

6.1.3. Càlcul de freqüències

Per a calcular les freqüències per a cada escenari accidental ([Equació 1](#)), es considera com a freqüència unitària de fuga en la canonada el valor de $5 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{any}^{-1}$ proposat pel manual BEVÍ per al trencament total de canonades enterrades.

	Flamarada	Sobrepessió
Mètode GESIP-1	250 m	50 m
Mètode GESIP-2	550 m	350 m

Taula 9. Resum de Longituds equivalents pels diferents mètodes

Aquestes freqüències es combinen amb les probabilitats corresponents a les diverses seqüències accidentals establertes en l'arbre d'esdeveniments:

$$f_{\text{GESIP-1 flamarada}} = 5 \cdot 10^{-7} \cdot 250 \cdot (0,5 \cdot 1 \cdot 0,6) = 3,75 \cdot 10^{-5} \text{ any}^{-1}$$

$$f_{\text{GESIP-1 sobrepessió}} = 5 \cdot 10^{-7} \cdot 50 \cdot (0,5 \cdot 1 \cdot 0,4) = 5 \cdot 10^{-6} \text{ any}^{-1}$$

$$f_{\text{GESIP-2 flamarada}} = 5 \cdot 10^{-7} \cdot 550 \cdot (0,5 \cdot 1 \cdot 0,6) = 8,25 \cdot 10^{-5} \text{ any}^{-1}$$

$$f_{\text{GESIP-2 sobrepessió}} = 5 \cdot 10^{-7} \cdot 350 \cdot (0,5 \cdot 1 \cdot 0,4) = 3,5 \cdot 10^{-5} \text{ any}^{-1}$$

	Flamarada	Sobrepessió
Mètode GESIP-1	$3,75 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-6}$
Mètode GESIP-2	$8,25 \cdot 10^{-5}$	$3,5 \cdot 10^{-5}$

Taula 10. Resum de freqüències aplicant els diferents mètodes

Aquestes, són per tant les que corresponen als escenaris accidentals de les dues branques de l'arbre d'esdeveniments ([Figura 28](#)).

Element iniciador	Ignició immediata	Ignició retardada	Sobrepessió	Escenari accidental	Freqüència
-------------------	-------------------	-------------------	-------------	---------------------	------------

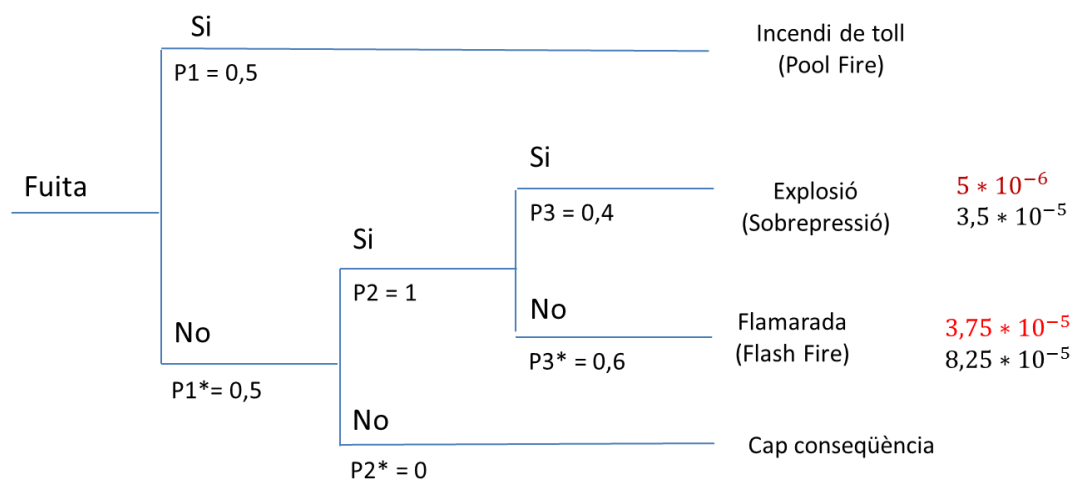


Figura 28. Arbre d'esdeveniments per al cas a estudiar. En vermell freqüències per al mètode GESIP-1, en negre per al mètode GESIP-2

6.1.4. Càlcul de víctimes i danys

6.1.4.1. Flamarada (efecte tèrmic)

En el càlcul de víctimes, es calcula l'àrea d'afectació de la flamarada al nucli urbà aplicant les fórmules geomètriques corresponents.

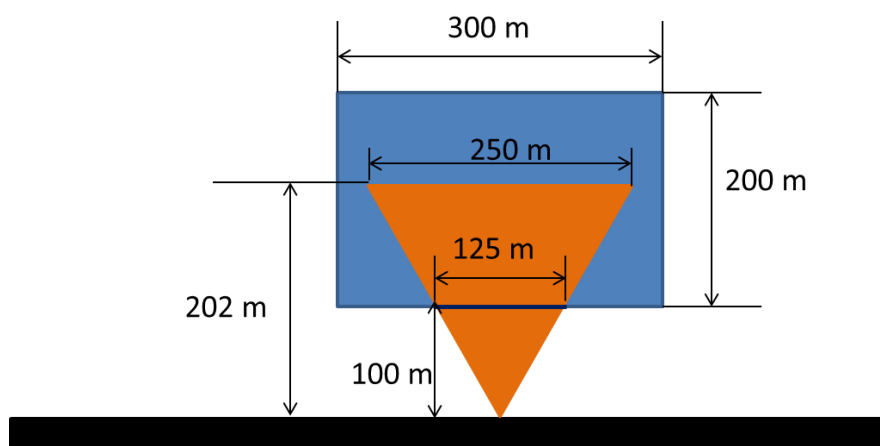


Figura 29. Esquema àrea d'afectació per la flamarada

$$\text{àrea poble} = 200 * 300 = 60000m^2$$

$$\text{àrea triangle gran} = \frac{250 * 202}{2} = 25520\text{m}^2$$

$$\text{àrea triangle petit} = \frac{125 * 100}{2} = 6250\text{m}^2$$

$$\text{àrea triangle gran} - \text{àrea triangle petit} = \text{àrea d'afectació} = 16270\text{m}^2$$

Suposant 600 persones repartides de manera uniforme al nucli urbà amb una àrea de 60.000m² i una àrea d'afectació de 16270m², el nombre de persones mortes equival a 163.

$$\frac{16270 * 600}{60000} = 162,7 \sim 163$$

6.1.4.2. Explosió (Sobrepessió)

Per calcular l'àrea d'afectació per sobrepessió, al tenir una geometria circular, es necessita un procés més laboriós tal com mostra la [Figura 31](#).

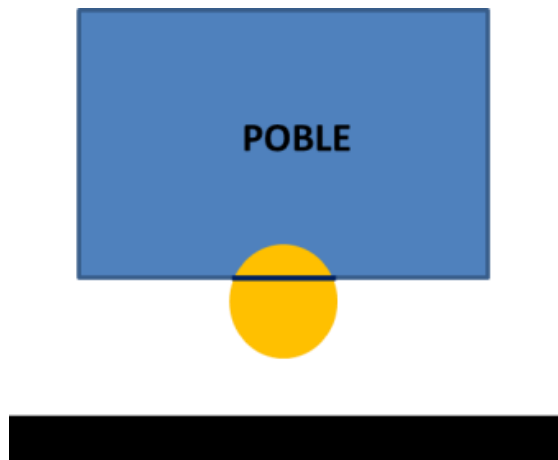


Figura 30. Esquema de l'àrea d'afectació per sobrepessió (letalitat)

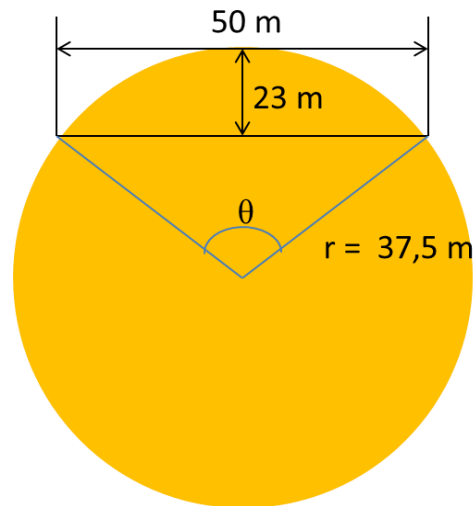


Figura 31. Sobrepressió. Geometria detallada

$$\sin\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{25}{37,5} = 0,6666$$

$$\theta = 2 * \arcsin(0,6666) = 1,459 \text{ rads}$$

$$\text{àrea sector circular} = \frac{\theta}{2} * r^2 = \frac{1,459}{2} * 37,5^2 = 1026,17m^2$$

$$\text{àrea triangle} = \frac{1}{3} * 50 * r^2 = \frac{1}{3} * 50 * 37,5^2 = 625m^2$$

$$\text{àrea sector circular} - \text{àrea triangle} = \text{àrea d'afectació} = 401,17m^2$$

Suposant 600 persones repartides de manera uniforme al nucli urbà amb una àrea de 60.000m² i una àrea d'afectació de 401,17m², el nombre de persones mortes equival a 4

$$\frac{401,17 * 600}{60000} = 4$$

6.1.5. Risc individual i línies d'ISO risc

El risc Individual en una determinada posició és el risc (morts/persona-any) al que es veu sotmesa una persona que estigui 24 h/dia, 365 dies/any, en un determinat punt. Aquest es calcula multiplicant la freqüència de cada escenari accidental per la seva probabilitat de mort en cada punt .

Una vegada calculat el risc individual, sumant els diferents valors obtinguts en un determinat punt, es calcula el valor de la línia d'ISO risc corresponent.

En el cas que s'està estudiant, es considera que les probabilitats de mort són 0 o 1, depenent de si la persona es troba fora o dins de l'abast tant de la flamarada com de l'explosió per sobrepressió.

Així doncs, els diferents valors de risc Individuals depenent del criteri GESIP aplicat, seran els que es detallen a continuació.

GESIP-1

$$\text{Risc Individual Sobrepressió} = 5,6 * 10^{-6} * 1 = 5,6 * 10^{-6}$$

$$\text{Risc individual Flamarada} = 3,75 * 10^{-5} * 1 = 3,75 * 10^{-5}$$

GESIP-2

$$\text{Risc Individual Sobrepressió} = 3,5 * 10^{-5} * 1 = 3,5 * 10^{-5}$$

$$\text{Risc individual Flamarada} = 8,25 * 10^{-5} * 1 = 8,25 * 10^{-5}$$

Tal com es mostra a la [Figura 32](#) els diferents trams a tenir en compte depenent del tipus d'escenari accidental són de 0 a 48 metres, de 48 a 123 metres, de 123 a 202 metres i de 202 metres en endavant.

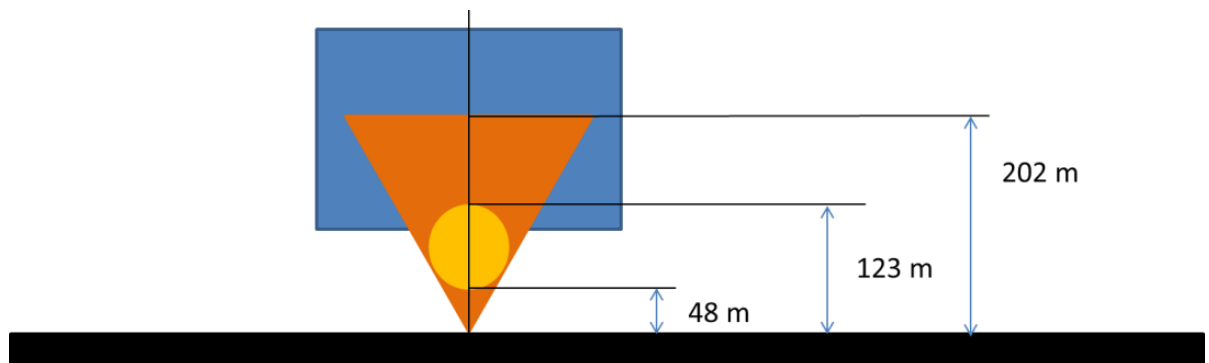


Figura 32. Distàncies a aplicar per al càlcul de les línies d'ISO risc

Combinant els diferents valors de risc individual pels diferents trams, s'obtenen els següents valors:

GESIP-1

TRAM 1 (0 a 48 metres)	$3,75 * 10^{-5}$
TRAM 2 (48 a 123 metres)	$3,75 * 10^{-5} + 5 * 10^{-6} = 4,25 * 10^{-5}$
TRAM 3 (123 a 202 metres)	$3,75 * 10^{-5}$
TRAM 4 (202 metres en endavant)	0

Taula 11. Valors línies ISO risc pel mètode GESIP-1

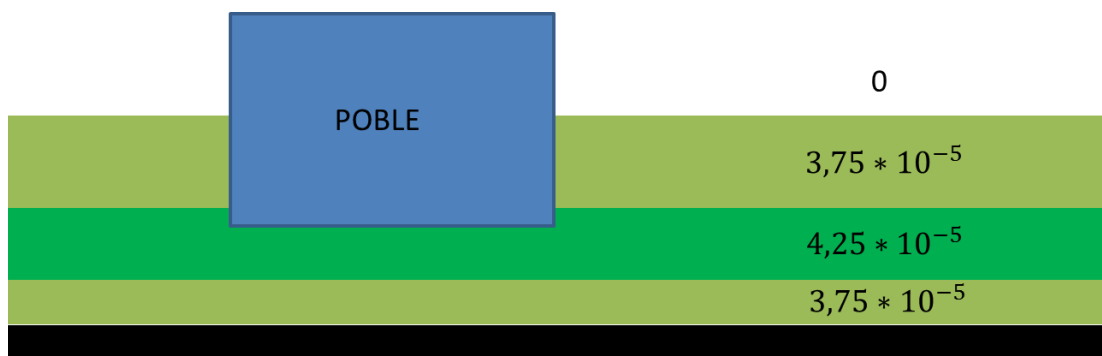


Figura 33. Línies d'ISO risc GESIP-1

GESIP-2

TRAM 1 (0 a 48 metres)	$8,25 * 10^{-5}$
TRAM 2 (48 a 123 metres)	$8,25 * 10^{-5} + 3,5 * 10^{-5} = 1,175 * 10^{-4}$
TRAM 3 (123 a 202 metres)	$8,25 * 10^{-5}$
TRAM 4 (202 metres en endavant)	0

Taula 12. Valors línies ISO risc per mètode GESIP-2

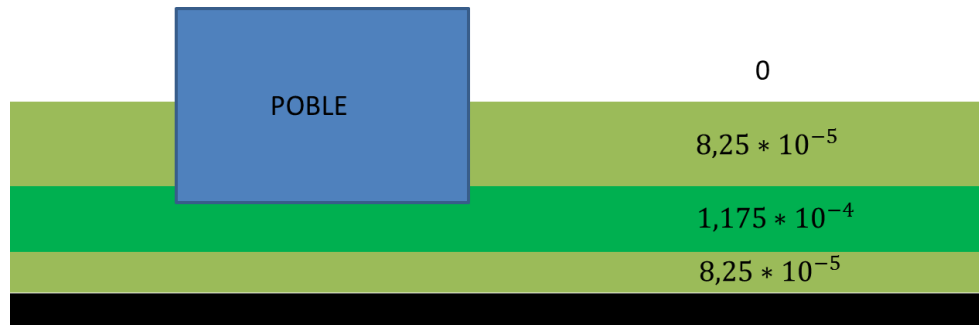


Figura 34. Línies d'ISO risc segons el mètode GESIP-2

6.2. Comparació de resultats

6.2.1. Risc individual

Tal com es pot veure en la , les principals diferències entre els dos mètodes són les longituds equivalents de *pipeline* a utilitzar i les freqüències obtingudes. Es pot arribar a la conclusió, però, que el mètode GESIP-2 és bastant més efectiu que el GESIP-1. Aquest últim, al concentrar els diferents elements vulnerables en un sol punt, esdevé un mètode poc fiable i realista en comparació a l'altre. Només tenint en compte les longituds equivalents, s'observa una notable diferència, que fa que el mètode GESIP-2 sigui molt més conservador i , també, més proper a la realitat, encara que és una mica més laboriós que el GESIP-1.

	GESIP-1		GESIP-2	
	Flamarada	Sobrepessió	Flamarada	Sobrepessió
L equivalent	250 m	50 m	550 m	350 m
Freqüència	$3,75 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$8,25 \cdot 10^{-5}$	$3,5 \cdot 10^{-5}$
Àrea d'afectació	16270 m ²	401,17 m ²	16270 m ²	401,17 m ²
Nombre de morts	163	4	163	4
Risc Individual	$3,75 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$8,25 \cdot 10^{-5}$	$3,5 \cdot 10^{-5}$

Taula 13. Taula resum de comparació pels dos mètodes.

6.2.2. Risc social

És molt interessant també calcular el risc social, que es defineix de la següent manera:

$$Risc\ social = \int (risc\ individual) * [densitat\ de\ població(x,y)] dx dy$$

Equació 2

El risc social sol presentar-se mitjançant una gràfica en la que en ordenades es mostra la freqüència dels accidents amb N o més morts, i en abscesses el nombre de víctimes mortals per a aquest accident. Aquest tipus de representació és molt útil per a comparar el risc de diverses situacions o activitats.

Les línies obtingudes en aquest cas representen els nivells de risc individual al voltant del nucli urbà analitzat. Connecten totes les localitzacions geogràfiques al voltant d'una activitat potencialment perillosa (en el nostre cas el trencament d'un *pipeline*) amb la mateixa probabilitat de mort.

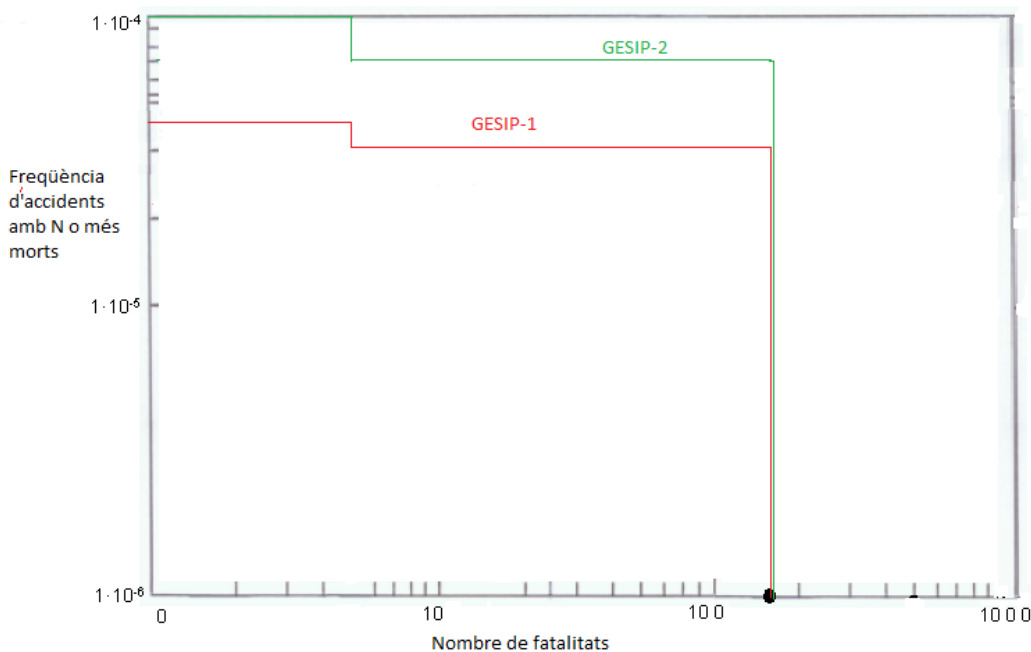


Figura 35. Risc social segons els valors obtinguts dels dos mètodes utilitzats

Tal com s'ha comentat anteriorment, el mètode GESIP-2, al ser més conservador i tenir en compte més longitud de canonada amb afectació a la zona urbana, presenta uns valors de freqüència mes elevats i, probablement, mes realistes. Cal recordar, però, que el nombre de víctimes mortals tant en un com en l'altre és el mateix (163 per flamarada i 4 per sobrepressió), variant en canvi la freqüència dels escenaris accidentals.

7. ESTUDI COMPARATIU – CAS 2

7.1. Anàlisi d'una fuga tòxica

En aquest apartat, suposant el mateix nucli urbà que al cas 1 (Figura 21) s'estudia la perforació d'una canonada que transporta amoníac líquid a una pressió de 20 bar. Es vessen 454 kg/min durant 20 minuts suposant que no hi ha ignició immediata. En els casos de fuga d'amoníac sol considerar-se negligible la probabilitat d'ignició i, per tant, l'explosió no es contempla. L'arbre d'esdeveniments corresponent és el de la Figura 14, en el qual s'observa que sense ignició immediata, l'escenari accidental que tindrà lloc serà un núvol tòxic d'amoníac (dispersió tòxica).

A la Figura 36 s'observa la simulació feta amb l'*Aloha* de les condicions descrites anteriorment. Tal com es pot apreciar, per aquest cas, el software mostra certes limitacions a l'hora de determinar exactament l'abast del núvol tòxic ja que les unitats, així com la separació de les diferents zones, no són prou nítides.

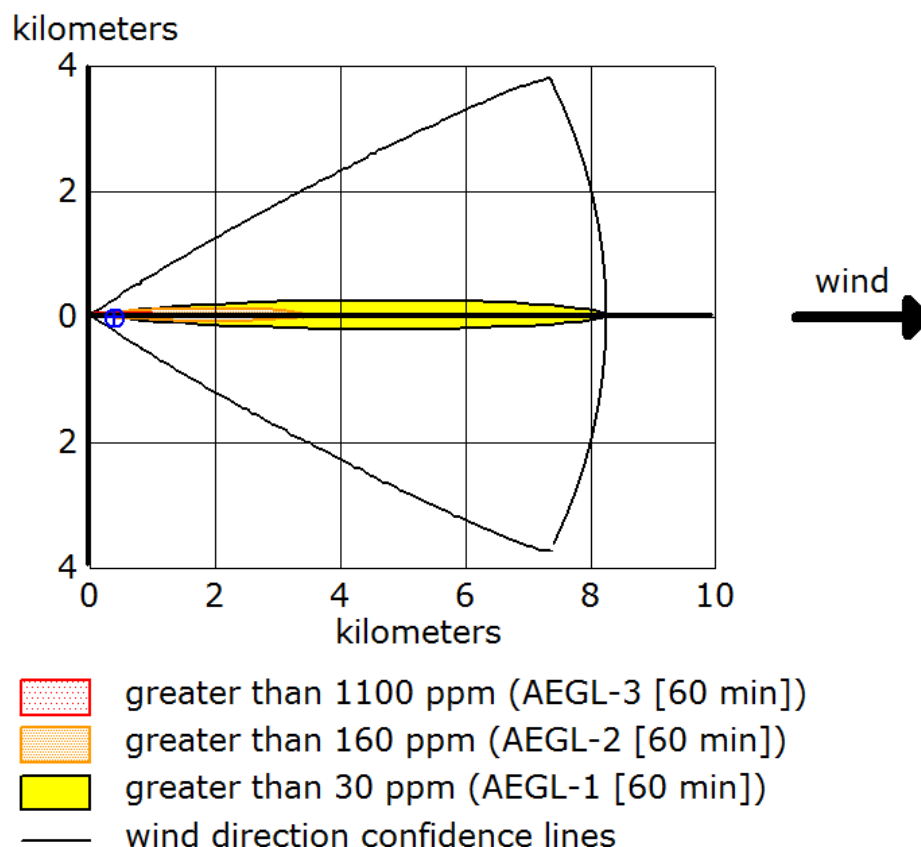


Figura 36. Abast del núvol tòxic simulat amb el software Aloha.

7.1.1. Dispersió tòxica

A l'hora de calcular l'abast del núvol tòxic i la longitud de *pipeline* equivalent per a cada mètode, s'ha assimilat la geometria de la dispersió a una geometria triangular.

7.1.1.1. GESIP-1

Tal com mostra la [Figura 37](#), la longitud equivalent per a poder aplicar el mètode GESIP-1 és de 34 metres.

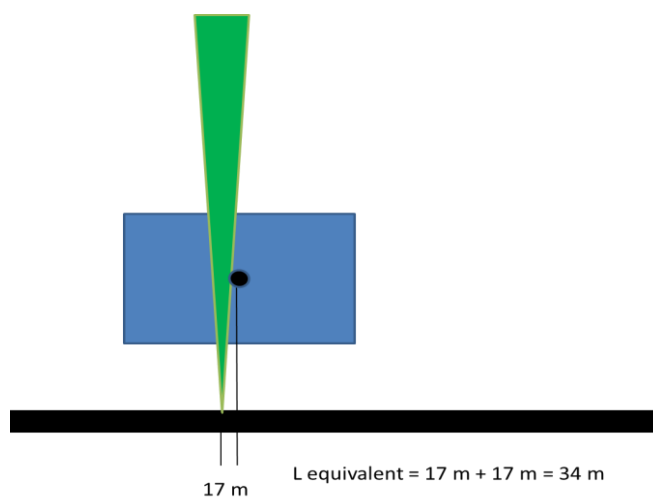


Figura 37. Càlcul L equivalent pel Mètode GESIP-1.

7.1.1.2. GESIP-2

En la [Figura 38](#), aplicant el mètode GESIP-2, la longitud a considerar es considera considerablement major. En aquest cas, s'obté una longitud de *pipeline* de 344 metres.

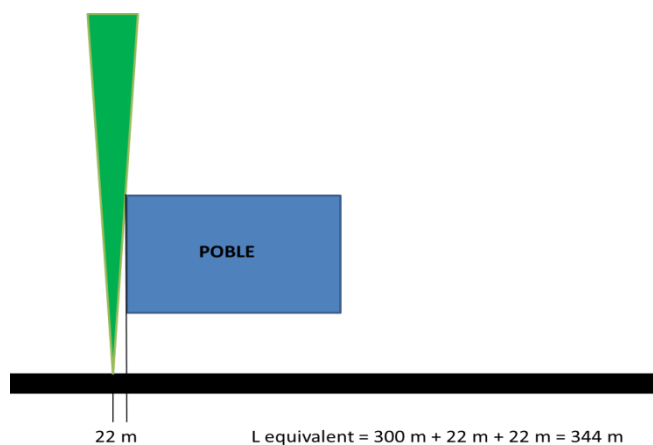


Figura 38. Càlcul L equivalent pel Mètode GESIP-2

7.1.2. Càlcul de freqüències

Per a calcular les freqüències per a cada escenari accidental (Equació 1) es considera com a freqüència unitària de fuga en la canonada el valor de $5 \cdot 10^{-7} \text{m}^{-1} \cdot \text{any}^{-1}$ proposat pel manual BEVÍ per a la perforació de canonades.

	Dispersió tòxica
Mètode GESIP-1	34 m
Mètode GESIP-2	344 m

Taula 14. Resum de longituds equivalents segons els diferents mètodes

Aquesta freqüència s'ha de combinar amb les probabilitats corresponents als diferents esdeveniments de l'arbre:

$$f_{\text{GESIP-1 Dispersió tòxica}} = 5 \cdot 10^{-7} \cdot 44 \cdot (1) = 1,7 \cdot 10^{-5} \text{ any}^{-1}$$

$$f_{\text{GESIP-2 Dispersió tòxica}} = 5 \cdot 10^{-7} \cdot 344 \cdot (1) = 1,72 \cdot 10^{-4} \text{ any}^{-1}$$

	Dispersió tòxica
Mètode GESIP-1	$1,7 \cdot 10^{-5}$
Mètode GESIP-2	$1,72 \cdot 10^{-4}$

Taula 15. Resum de freqüències aplicant els diferents mètodes

Aquestes freqüències són per tant les corresponents als escenaris accidentals de l'arbre d'esdeveniments del cas d'estudi (Figura 39).

Element iniciador	Escenari accidental	Freqüència
Fuita $P1 = 1$	Dispersió tòxica	$1,7 * 10^{-5}$ $1,72 * 10^{-4}$

Figura 39. Arbre d'esdeveniments per al cas a estudiar. En vermell freqüències per al mètode GESIP-1, en negre per al mètode GESIP-2

7.1.3. Càlcul de víctimes i danys

En la Figura 40 es poden veure les diferents longituds a tenir en compte a l'hora de poder calcular l'àrea d'afectació del núvol tòxic.

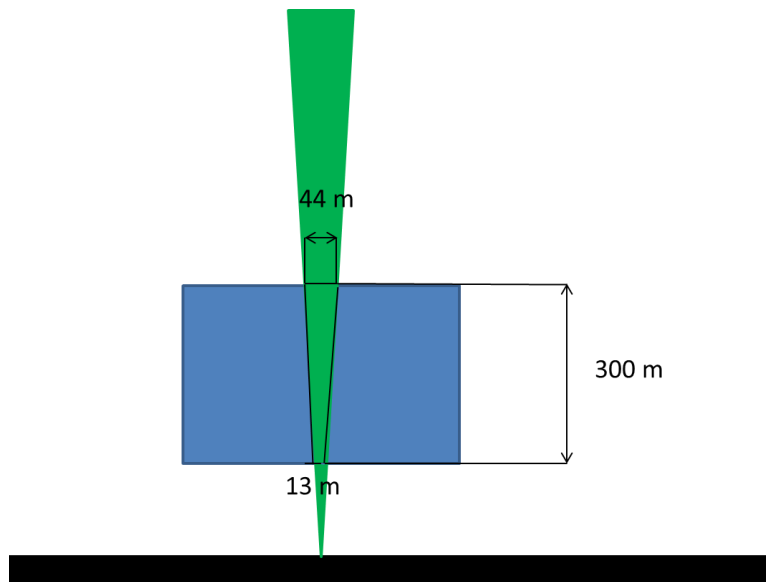


Figura 40. Esquema àrea afectació per a dispersió tòxica

$$\text{àrea poble} = 200 * 300 = 60000m^2$$

$$\text{Àrea trapezi} = \text{Àrea d'afectació} = \frac{(44 + 13) * 300}{2} = 8550 m^2$$

$$\text{persones dins l'àrea d'afectació} = \frac{8550 * 600}{60000} = 85,5 \sim 86$$

En aquest cas d'estudi, per al càlcul de víctimes, s'utilitza la funció pròbit per a vulnerabilitat a les substàncies tòxiques (Equació 3). Per tal de poder-la utilitzar es calcula el paràmetre D (dosi) amb la Equació 4, la qual determina la dosi si la concentració de la fuga tòxica es constant en cada interval de temps.

Depenent de la distància a on s'està situat respecte a la canonada, les concentracions varien. Amb l'ajuda del software *Aloha* determina les diferents concentracions cada 50 metres obtenint els resultats que es veuen a la Taula 16.

Distància	Concentració
100 m	90000 ppm
150 m	41000 ppm
200 m	24000 ppm
250 m	15500 ppm
300 m	12000 ppm

Taula 16. Valors de concentració depenent de la distància

$$y = a + b * \ln(D)$$

Equació 3

$$D = \sum (C^n * t)$$

Equació 4

Les constants a, b i n venen definides per a diferents substàncies en el Llibre de problemes i pràctiques de l'assignatura de tecnologia del medi ambient i sostenibilitat de l'Escola Tècnica d'Enginyeria Tècnica de Barcelona.[9] Per amoníac, són les que es poden observar a la Taula 17.

Amoníac	a = -35,90	b = 1,85	n = 2
----------------	------------	----------	-------

Taula 17. Constants a aplicar en la funció Probit per a amoníac

Així doncs, tenint en compte les constants i les equacions descrites, els valors D obtinguts són els següents:

$$D_{100} = 90000^2 * 20 = 162000000000$$

$$D_{150} = 41000^2 * 20 = 33620000000$$

$$D_{200} = 24000^2 * 20 = 11520000000$$

$$D_{250} = 15500^2 * 20 = 4805000000$$

$$D_{300} = 12000^2 * 20 = 2880000000$$

Pel que fa a l'equació Probit, s'obtenen aquests valors:

$$y = -35,90 + 1,85 * \ln(162000000000) = 11,85$$

$$y = -35,90 + 1,85 * \ln(33620000000) = 8,94$$

$$y = -35,90 + 1,85 * \ln(11520000000) = 6,95$$

$$y = -35,90 + 1,85 * \ln(4805000000) = 5,34$$

$$y = -35,90 + 1,85 * \ln(2880000000) = 4,39$$

A continuació, utilitzant la taula que relaciona la funció Probit i el percentatge d'afectats situada en el mateix document descrit anteriorment [9] (Figura 41), es determina el percentatge de mortalitat per a cada distància. Tots els valors obtinguts, així com el de la concentració, dosi i el valor de la funció Probit es mostren a la Taula 22.

	Concentració (ppm)	Dosi	Valor Probit	Percentatge mortalitat (%)
100 m	90000	162000000000	11,85	100
150 m	41000	33620000000	8,94	100
200 m	24000	11520000000	6,95	97
250 m	15500	4805000000	5,34	63,5
300 m	12000	2880000000	4,39	27

Taula 18. Constants a aplicar en la funció Probit per a amoníac

Relationship between the probit variable and the percentage [1]

%	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0		2.67	2.95	3.12	3.25	3.36	3.45	3.52	3.59	3.66
10	3.72	3.77	3.82	3.87	3.92	3.96	4.01	4.05	4.08	4.12
20	4.16	4.19	4.23	4.26	4.29	4.33	4.36	4.39	4.42	4.45
30	4.48	4.50	4.53	4.56	4.59	4.61	4.64	4.67	4.69	4.72
40	4.75	4.77	4.80	4.82	4.85	4.87	4.90	4.92	4.95	4.97
50	5.00	5.03	5.05	5.08	5.10	5.13	5.15	5.18	5.20	5.23
60	5.25	5.28	5.31	5.33	5.36	5.39	5.41	5.44	5.47	5.50
70	5.52	5.55	5.58	5.61	5.64	5.67	5.71	5.74	5.77	5.81
80	5.84	5.88	5.92	5.95	5.99	6.04	6.08	6.13	6.18	6.23
90	6.28	6.34	6.41	6.48	6.55	6.64	6.75	6.88	7.05	7.33
-	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
99	7.33	7.37	7.41	7.46	7.51	7.58	7.65	7.75	7.88	8.09

Figura 41. Taula amb els diferents valors de la funció Probit i el percentatge de mortalitat corresponent

Així doncs, depenent de la posició de l'element vulnerable (persones) en el nucli urbà, es tindran mes o menys morts. Si es consideren les 600 persones concentrades en aquestes diverses àrees d'afectació, s'obtenen els següents valors de mortalitat:

$$\text{Mortalitat } 100 \text{ m} = 86 * 1 = 86$$

$$\text{Mortalitat } 150 \text{ m} = 86 * 1 = 86$$

$$\text{Mortalitat } 200 \text{ m} = 86 * 0,97 = 83,42 \sim 84$$

$$\text{Mortalitat } 250 \text{ m} = 86 * 0,635 = 54,61 \sim 55$$

$$\text{Mortalitat } 300 \text{ m} = 86 * 0,27 = 23,2 \sim 24$$

7.2. Comparació de resultats

	GESIP-1	GESIP-2
L equivalent	34	344
Freqüència	$1,7 * 10^{-5}$	$1,72 * 10^{-4}$
Àrea d'afectats	8550 m ²	8550 m ²

Taula 19. Taula resum dels valors obtinguts al segon cas d'estudi

Tal com s'observa a la [Taula 19](#), al igual que al cas d'estudi 1, es tenen uns valors de freqüència i longitud a considerar de *pipeline* més elevats i més realistes aplicant el mètode GESIP-2. Així doncs, es torna a manifestar que el mètode GESIP-1 és més òptim per tal de realitzar prediccions. Cal tornar a remarcar que el nombre de víctimes mortals serà el mateix tant per un mètode com per l'altre.

7.2.1. Combinació dels diferents impactes

Tenint en compte tant la dificultat com el cost que representen establir un corredor de terreny per al pas dels *pipelines*, sovint se n'instal·len en el mateix més d'un. En aquest cas, els efectes dels escenaris accidentals que poden ocórrer en totes les canonades existents en el corredor s'han de superposar; d'altra banda, això fa també possible que l'accident ocorregut en una de les canonades afecti a l'altra pel denominat "efecte dominó".^[10]

Aquest cas es podria donar, per exemple, si hi hagués els dos *pipelines* considerats un al costat de l'altre. En aquest cas, caldrà tenir en compte simultàniament els efectes dels escenaris accidental abans considerats. L'esquema representatiu així com els diferents valors de risc individual es troben a la [Figura 42](#), [Taula 20](#) i [Taula 21](#) respectivament.

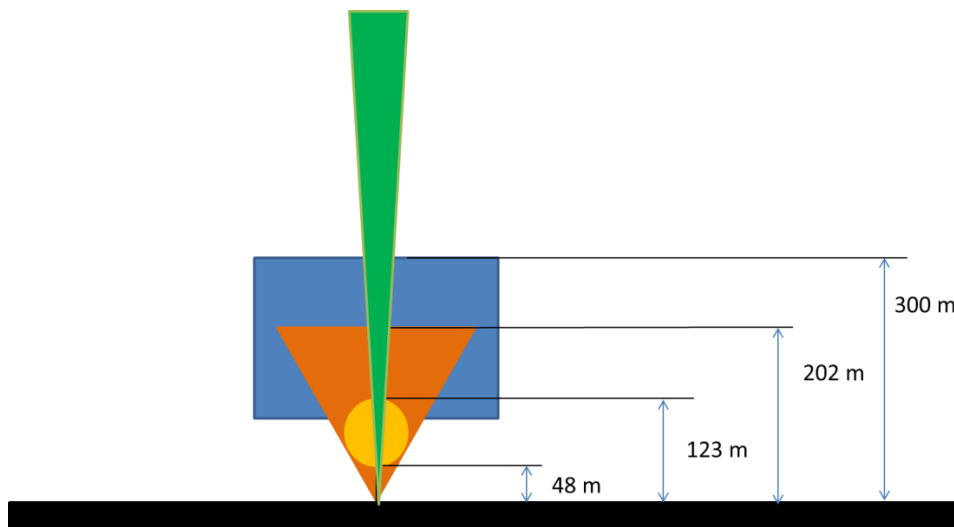


Figura 42. Diferents escenaris accidentals possibles amb trams d'afectació

GESIP-1

TRAM 1 (0 a 48 metres)	$3,75 * 10^{-5} + 1,7 * 10^{-5} = 5,45 * 10^{-5}$
TRAM 2 (48 a 123 metres)	$3,75 * 10^{-5} + 5 * 10^{-6} + 1,7 * 10^{-5} = 5,95 * 10^{-5}$
TRAM 3 (123 a 202 metres)	$3,75 * 10^{-5} + 1,7 * 10^{-5} = 5,45 * 10^{-5}$
TRAM 4 (202 a 300 metres)	$1,7 * 10^{-5}$

Taula 20. Valors de risc individual per a mètode GESIP-1

GESIP-2

TRAM 1 (0 a 48 metres)	$8,25 * 10^{-5} + 1,72 * 10^{-4} = 2,545 * 10^{-4}$
TRAM 2 (48 a 123 metres)	$8,25 * 10^{-5} + 3,5 * 10^{-5} + 1,72 * 10^{-4} = 2,895 * 10^{-4}$
TRAM 3 (123 a 202 metres)	$8,25 * 10^{-5} + 1,72 * 10^{-4} = 2,545 * 10^{-4}$
TRAM 4 (202 a 300 metres)	$1,72 * 10^{-4}$

Taula 21. Valors de risc individual per a mètode GESIP-2

Pel que fa als esquemes amb els valors de les línies d'ISO risc, es troben a la [Figura 43](#) i [Figura 44](#).

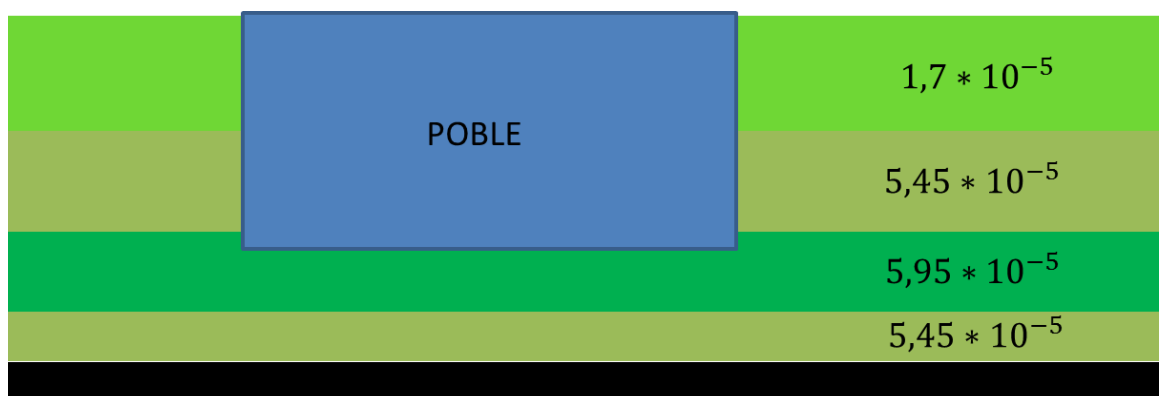


Figura 43. Línies d'ISO risc segons el mètode GESIP-1

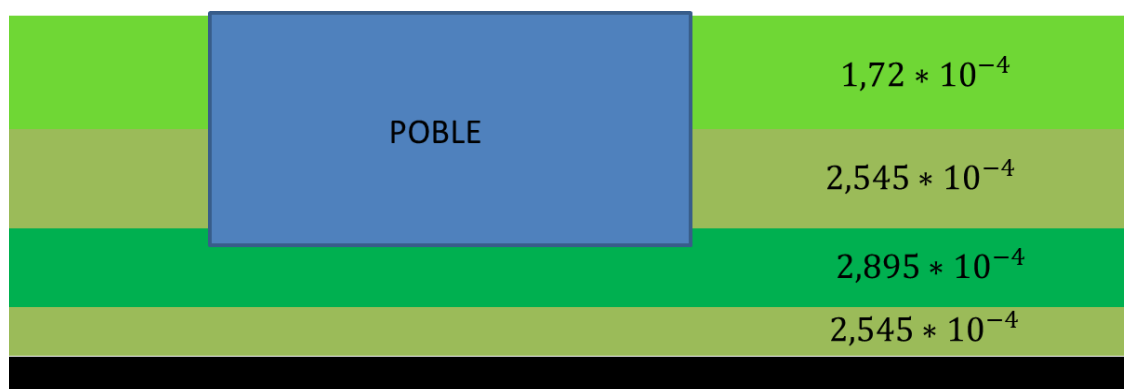


Figura 44. Línies d'ISO risc segons el mètode GESIP-2

Pel que fa a les línies d'ISO risc, s'aprecia una notable diferència entre un mètode i l'altre, obtenint amb el mètode GESIP-2 valors fins a 10 vegades més elevats. Cal dir que la zona més conflictiva i perillosa es situa on els tres possibles escenaris accidentals podrien coincidir (Tram 2).

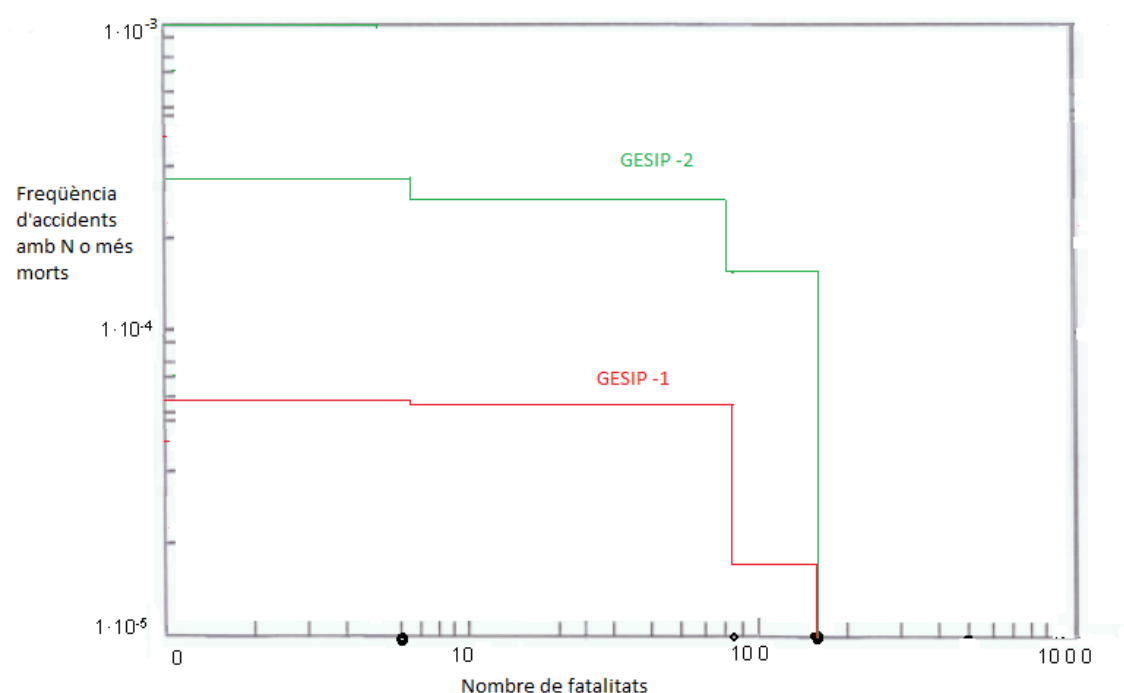


Figura 45. Risc social

Com es torna a veure, al igual que en el cas d'estudi 1 el mètode GESIP-2 torna a presentar valors de freqüència més elevats i, probablement, més realistes. En aquest exemple també es pot veure com aquesta diferència de valors s'accentua encara una mica més.

El nombre de víctimes mortals utilitzant un o altre mètode, però, tornarà a ser el mateix variant en canvi la freqüència dels escenaris accidentals.

Els resultats obtinguts en ambdós casos permeten concloure, per tant, que el mètode GESIP-1 és molt menys conservador i condueix a resultats excessivament optimistes, que quedarien superats en severitat en cas d'un accident real. El mètode GESIP-2 es considera, doncs, molt millor i és el que s'aconsella utilitzar per a l'anàlisi del risc en el transport per canonada.

Tots aquests valors obtinguts, però, són tenint en compte unes probabilitats de mort del 100 % si s'està dins de la zona d'afectació i 0 si s'està fora. Aquesta simplificació sol ser molt efectiva en casos d'explosions per sobrepressió i flamarada, però no del tot per núvol tòxics. A continuació, només tenint en compte la fuga tòxica, s'han calculat les línies d'ISO risc tenint en compte les probabilitats canviant depenent de la distància al *pipeline*. S'han representat les línies amb valors de $1 \cdot 10^{-5}$ i $1 \cdot 10^{-6}$. Aquest últim valor es especialment important ja que sovint es utilitza per delimitar la zona en la qual es tindrà una afectació rellevant per a la salut humana.

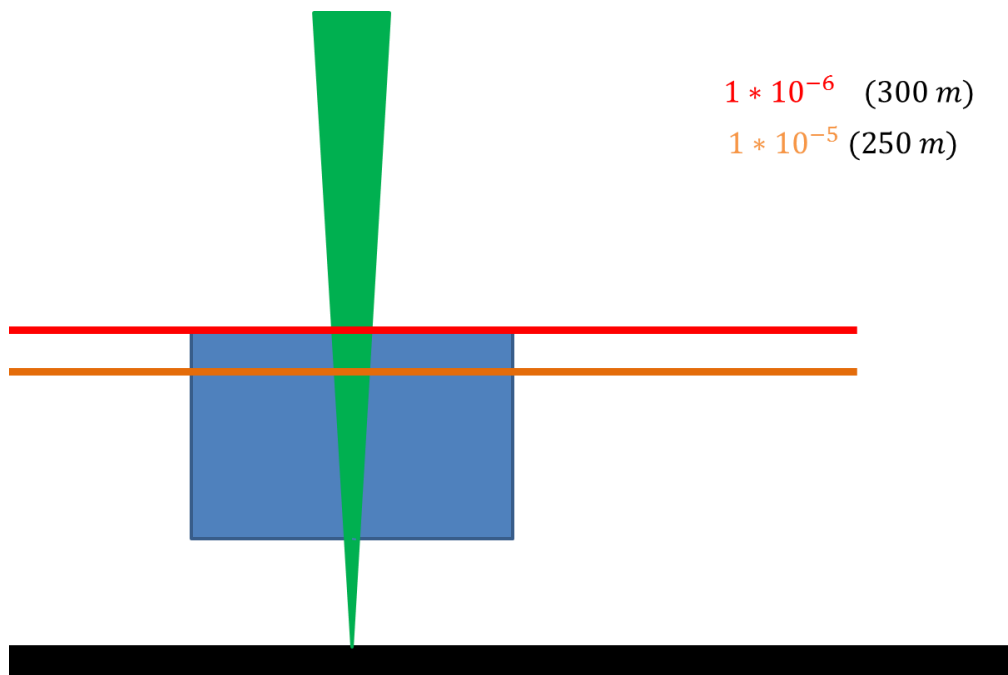


Figura 46. Risc individual per GESIP-1.

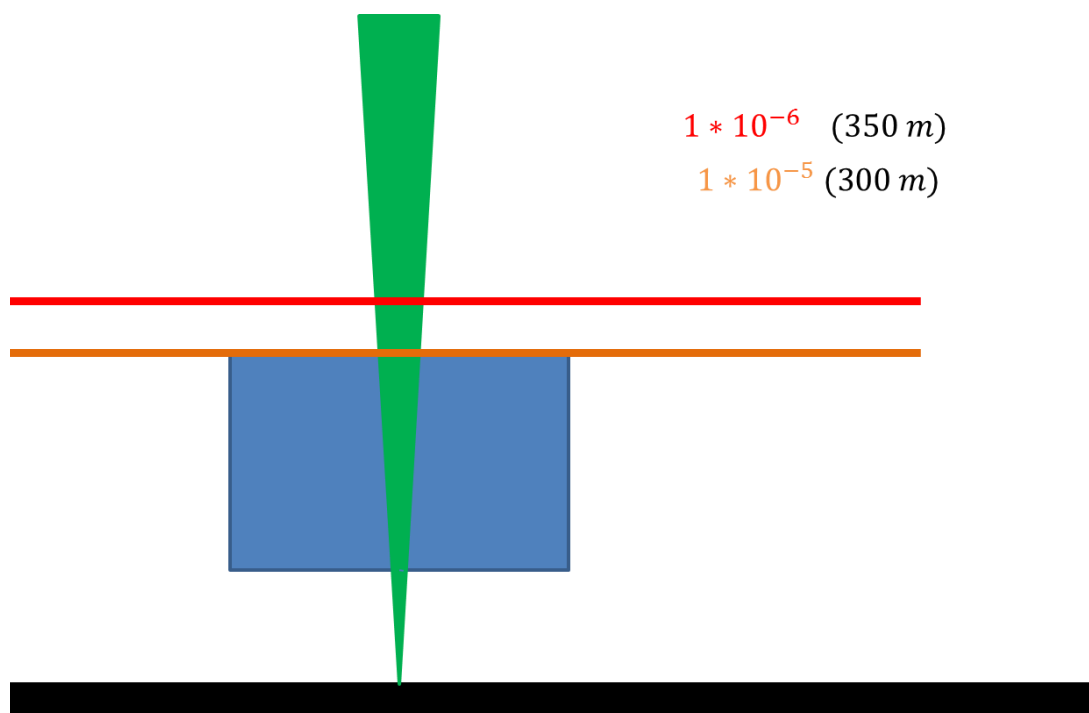


Figura 47. Risc individual per GESIP-2.

Tal com s'observa, i seguint la tendència dels exemples anteriors, al ser el mètode GESIP-2 més conservador i considerar una longitud de canonada superior, les línies d'ISO risc assoliran valors superiors. S'aprecia que el valor llindar de $1 * 10^{-6}$ pel primer mètode es troba just al límit de la zona habitada. En canvi, pel segon mètode, aquest es troba a 350 metres.

8. PLANIFICACIÓ TEMPORAL I COSTOS

A continuació es detalla l'estudi econòmic del projecte, en el qual s'ha tingut en compte un preu de 25 €/hora (enginyer sense experiència) i de 70 €/hora (enginyer sènior pel que fa a les despeses de personal.

Concepte	Hores	Preu (€)
Investigació i recopilació d'informació	80	2000
<i>Aloha</i> (simulacions)	10	250
Reunions	10	250
Realització de la memòria escrita	250	6250
Revisió de continguts	40	1000
TOTAL	390	9750

Taula 22. Despeses enginyer sense experiència

Concepte	Hores	Preu (€)
Reunions i revisió de continguts	25	1750
TOTAL	25	1750

Taula 23. Despeses enginyer sènior

Concepte	Preu (€)
Llum i Internet	300
Desplaçaments (avió i tren)	250
Material	70
Dietes	120
TOTAL	740

Taula 24. Altres despeses

CONCEPTE	PREU (€)
Despeses enginyer sense experiència	9750
Despeses enginyer sènior	1750
Altres despeses	740
TOTAL PROJECTE	12240

Taula 25. Resum cost total del projecte

En la Figura següent s'ha representat el diagrama de Gantt, amb la distribució temporal de les tasques dutes a terme en la realització del treball de fi de grau.

9. ESTUDI AMBIENTAL

En aquest projecte, al ser de caire teòric i no tenir cap part pràctica, les principals fonts d'impacte ambiental a tenir en compte són la utilització d'energia elèctrica tant en l'ordinador com en diferents aparells com làmpades, transformadors, etc. i el material utilitzat per a la seva realització, com pot ser el paper emprat i bolígrafs.

Entre fulls d'esborrany per fer càlculs i els papers utilitzats per imprimir la versió final del projecte s'han fet servir uns 600 fulls de mida DIN-A4, que equivalen aproximadament a 3,5 kg. Aquests, quan deixin de tenir cap interès, es dipositaran al contenidor de reciclatge blau destinat a la recollida selectiva de paper i cartró.

Pel que fa a l'energia utilitzada, principalment prové de l'ús de l'ordinador utilitzat per a realitzar la memòria. El consum d'aquest, tenint en compte totes les seves parts, és aproximadament de 250 W. Es calcula que s'ha estat treballant en ell durant unes 400 hores, el que equival a 100kWh consumits.

Per últim, degut a que la residència actual del realitzador del projecte es troba a Alemanya, cal tenir en compte els diferents consums i les emissions a l'atmosfera tant de l'avió agafat per assistir a algunes reunions com de l'automòbil emprat per arribar fins als diferents aeroports.

D'acord amb les consideracions exposades, es pot concloure que l'impacte ambiental generat per la realització del projecte no és gaire significatiu.

CONCLUSIONS

El projecte s'ha desenvolupat satisfactòriament, assolint els objectius que es plantejaven a l'inici. Les principals conclusions que es poden deduir de l'anàlisi realitzada són les següents:

- En les darreres dècades la longitud de *pipelines* instal·lats ha crescut d'una manera molt significativa i amb ella el nombre d'accidents enregistrats. Els dos països amb més incidència en ambdós aspectes són, amb molta diferència, els Estats Units i Rússia.
- L'anàlisi històrica de 1643 accidents ha posat de manifest un increment, en conjunt, de la seva freqüència en el temps. També ha permès establir clarament que les substàncies més usuals en els accidents han estat el petroli i el gas natural (que també són les substàncies amb més quilòmetres de canonada instal·lats). Pel que fa a les causes, les més freqüents han resultat ser les activitats de tercers, la corrosió i les fallades mecàniques.
- El software *Aloha* presenta algunes limitacions a l'hora de simular accidents en *pipelines*. Aquestes es donen tant en el ventall de possibles combinacions a simular com en la correcta interpretació dels gràfics obtinguts. El cas d'estudi 2 n'és un clar exemple, doncs és resulta una mica difícil saber de manera exacta les diferents distàncies de l'abast del núvol tòxic d'amoníac. Es pot concloure, que per estudis futurs, seria bo trobar una altra eina amb més possibilitats per tal d'obtenir resultats més rigorosos (tot i que cal esmentar, en favor de *Aloha*, que és de lliure accés).
- El mètode GESIP-2 presenta uns resultats millors i més propers a la realitat a l'hora de predir les diferents conseqüències que pot ocasionar un accident en un *pipeline*. Això es deu al fet que, en ser més conservador i tenir en compte una longitud de la canonada superior a la que es considera al mètode GESIP-1, presenta uns valors de freqüència més elevats, i probablement, més realistes. Evidentment, això implica una mica més d'esforç de càlcul.
- En conjunt, tant pel que fa a incendi de flamarada com a explosió o fuga tòxica, el GESIP-2 pot considerar-se un mètode fiable i adequat per a dur a terme l'anàlisi de risc de *pipelines*.
- Tot i que han millorat molt —especialment en els països més avançats— la regulació i les mesures de seguretat, continuen ocorrent accidents amb una freqüència important. Per tant, és considera necessària una major conscienciació de les autoritats, així com de la població, per tal de donar-los-hi la importància que es mereixen i millorar les condicions i la protecció al llarg del seu recorregut.

En aquest sentit, l'anàlisi de riscos hauria de ser una eina essencial; considero que hauria de ser una mesura obligatòria, com és ja en el cas de determinades plantes químiques.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Major Hazardous Incident Data Service (MHIDAS), 2007. In AEA technology. London: HSE-Health and Safety Executive (United Kingdom)
- [2] CASAL, J. *Evaluation of the Effects and Consequences of Major Accidents in Industrial Plants*, Industrial Safety Services, vol. 8, Elsevier. Amsterdam, 2008.
- [3] VÍLCHEZ, J. A; ESPEJO, V.; CASAL, J.. *Generic event trees and probabilities for the release of different types of hazardous materials*. Journal of Loss Prevention in the process Industries. 11-01-2011.
- [4] GESIP. *Guide methodologique pour la réalisation d'une étude de dangers concernant une canalisation de transport*. Rapport n° 2008/01. Paris, 2012.
- [5] BEVI. *Reference manual Bevi risk assessment*. National Institute of Public Health and the Environment (RIVM). Bilthoven, 2009.
- [6] GESIP. *Guide methodologique pour la réalisation d'une étude de dangers concernant une canalisation de transport*. Rapport n° 2008/01. Paris, 2012.
- [7] HEMMATIAN, B; ABDOLHAMIDZADEH, B; DARBRA, R.M.; CASAL, J. *The significance of domino effect in chemical accidents*. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 15-01-2014.
- [8] RAMÍREZ-CAMACHO, J.G; PASTOR, E; CASAL, J; AMAYA-GÓMEZ, R; MUÑOZ-GIRALDO, F. *Analysis of domino effect in pipelines*. Journal oh Hazardous Materials. 21-05-2015.
- [9] ARNALDOS, J; BOU, J; CASAS, I; CORTINA, J.L.; MARTÍ, V; DE PABLO, J; PASTOR, E; PLANAS, E; SAPERAS, N; VALDERRAMA, C, *Tecnologia del Medi Ambient. Problemes i Pràctiques*. Serveis Gràfics Copisteria Imatge, SL. Barcelona, Setembre 2013.
- [10] CRAWL, D. A., LOUVAR, J. F. *Chemical Process Safety, Fundamentals with applications*. Prentice Hall. New York, 2011.